

IVANO ALESSANDRO DEVILLA

**SIMULAÇÃO DE DETERIORAÇÃO E DE DISTRIBUIÇÕES DE
TEMPERATURA E TEOR DE UMIDADE EM UMA MASSA DE
GRÃOS ARMAZENADOS EM SILOS COM AERAÇÃO**

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”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2002

IVANO ALESSANDRO DEVILLA

**SIMULAÇÃO DE DETERIORAÇÃO E DE DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURA
E DE UMIDADE EM UMA MASSA DE GRÃOS ARMAZENADOS EM SILOS
COM AERAÇÃO**

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: 22 de fevereiro de 2002.

Prof. Ricardo dos Santos Ferreira
(Conselheiro)

Dr. Ednilton Tavares de Andrade

Prof. Guido de Souza Damasceno

Dr. Roberto Sínicio

Prof^a. Sandra Maria Couto
(Orientadora)

A Deus, pela vida.

À minha família,
especialmente aos meus pais, Ivo e Irene

À Flávia Martins de Queiroz, minha esposa,
pelo amor, pelo carinho e pela compreensão.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar este curso.

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

À Professora Sandra Maria Couto, pela orientação, amizade e confiança.

Aos Professores conselheiros Daniel Marçal de Queiroz, Juarez de Sousa e Silva e Ricardo dos Santos Ferreira, pela amizade e pelas sugestões.

Ao professor Sérgio Zonier pelo auxílio na realização deste trabalho.

Aos amigos Carlos Moises, Solenir Ruffato, Tadayuki Yanagi, Gilmar Vieira, pela amizade, convivência, incentivos e pelas sugestões nos períodos de estudo.

Ao amigo Ednilton, pelas sugestões e contribuições, pelo apoio e incentivo.

Ao Professor Guido Damasceno e Roberto Sinício, pelas sugestões e contribuições.

Aos colegas Claudia, Wederson, Adriana, Fátima, Fabrício, Paulo Jr., Sérgio, Roberta, Enilce, Arienilmar, Nori, pelo apoio e incentivo.

Aos funcionários, Silas, Galinari, José Raimundo, “Nhame”, Zé Mauro, Sebastião “Catitu” e Edison, pelo apoio na realização deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, somaram os esforços que levaram à concretização deste trabalho, agradeço de coração e lhes dedico minha amizade.

BIOGRAFIA

IVANO ALESSANDRO DEVILLA, filho de Ivo Devilla e Irene Devilla, nasceu em Rio Grande, Estado do Rio Grande do Sul, no dia 3 de agosto de 1972.

Em março de 1991, iniciou o curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas – RS, diplomando-se em janeiro de 1996.

No período de janeiro a dezembro de 1995, atuou como bolsista de iniciação científica no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Pelotas.

Em março de 1996, ingressou no curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, concentrando seus estudos na Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Vegetais, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 1998.

Em março de 1998, ingressou no curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, concentrando seus estudos na Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Vegetais.

Em fevereiro de 2002, submeteu-se à defesa de tese, logrando aprovação.

Em fevereiro de 2002 foi contratado pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, como professor titular da disciplina de Secagem e Armazenamento de Produtos Vegetais no curso de Engenharia Agrícola.

ÍNDICE

RESUMO.....	vii
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO	1
LITERATURA CITADA.....	4
PROPRIEDADES TÉRMICAS DE GRÃOS DE MILHO.....	5
RESUMO.....	5
THERMAL PROPERTIES OF CORN GRAINS	5
ABSTRACT	5
INTRODUÇÃO	6
MATERIAL E MÉTODOS.....	9
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
CONCLUSÕES	15
LITERATURA CITADA.....	16
DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE AR EM SILOS COM SISTEMA DE AERAÇÃO: ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	20
RESUMO.....	20
AIRFLOW DISTRIBUTION IN AERATED BINS: FINITE ELEMENT ANALYSIS	20
ABSTRACT	20
INTRODUÇÃO	21
MATERIAL E MÉTODOS.....	24
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
CONCLUSÕES	34
LITERATURA CITADA.....	35
VARIAÇÃO DE TEMPERATURA E UMIDADE DE GRÃOS ARMAZENADOS EM SILOS COM AERAÇÃO	37
RESUMO.....	37
VARIATIONS OF TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT OF STORED GRAINS IN SILOS WITH AERATION	38
ABSTRACT	38
INTRODUÇÃO	39
MATERIAL E MÉTODOS.....	41

RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
CONCLUSÕES	52
LITERATURA CITADA.....	53
MODELAGEM DA DETERIORAÇÃO E DAS DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURA E UMIDADE DE GRÃOS ARMAZENADOS EM SILOS COM AERAÇÃO	56
RESUMO.....	56
MODELING OF THE DETERIORATION AND DISTRIBUTIONS OF TEMPERATURE AND MOISTURE OF STORED GRAINS IN SILOS WITH AERATION.....	57
ABSTRACT	57
INTRODUÇÃO	58
MATERIAL E MÉTODOS.....	62
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
CONCLUSÕES	78
LITERATURA CITADA.....	78
RESUMO E CONCLUSÕES	82

RESUMO

DEVILLA, Ivano Alessandro, D.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2002. **Simulação de deterioração e de distribuições de temperatura e teor de umidade em uma massa de grãos armazenados em silos com aeração.** Orientador: Sandra Maria Couto. Conselheiros: Daniel Marçal de Queiroz, Juarez de Sousa e Silva e Ricardo dos Santos Ferreira.

Este trabalho teve como objetivo geral a modelagem da distribuição de ar, de transferência de calor e de massa e da deterioração em um sistema constituído de grãos de milho armazenados em um silo metálico provido de aeração. Os objetivos específicos foram: (a) determinar, experimentalmente, os parâmetros (condutividade térmica, calor específico, difusividade térmica e massa específica) envolvidos nos modelos; (b) desenvolver, utilizando a técnica de elementos finitos, um modelo computacional, bidimensional, para prever a distribuição de ar no interior de uma massa de grãos sob aeração; (c) desenvolver um modelo bidimensional para determinação da distribuição de temperatura e de teor de umidade no sistema durante o processo de aeração usando os resultados obtidos pelo modelo de distribuição de ar; (d) implementar um modelo para determinação da deterioração da massa de grãos utilizando os resultados obtidos pelo modelo de distribuição de temperatura e umidade e (e) obter, experimentalmente, as distribuições de temperatura e de teor de umidade, em uma massa de grãos de milho armazenada em um silo metálico cilíndrico, dotado de aeração visando à validação dos modelos de distribuição de ar e da transferência de calor e de

massa. Equacionou-se a condutividade térmica de amostras de milho ($w \text{ m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), com teor de umidade (U), na faixa de 11,3 a 18,4% b.u., como: $k = 0,0024 U + 0,127 \pm 0,004302$; o calor específico de amostras de milho ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), com teor de umidade faixa de 11,3 a 18,4% b.u., como: $c_p = 0,0636 U + 1,0662$. No modelo de distribuição de ar, o sistema modelado, consistiu de uma massa de grãos de milho (13% b.u.) contida, até uma altura de 1,6 m, em um silo metálico cilíndrico de 1,8 m de raio. O sistema foi considerado simétrico em relação ao eixo longitudinal central do silo, eixo Y. Escoamento de ar foi introduzido na parte inferior do sistema, através de uma abertura simulando um duto circular perfurado (largura de 0,2 m). A técnica de elementos finitos foi utilizada na modelagem da distribuição de ar do no silo. O sistema foi discretizado em 1550 elementos retangulares, totalizando 1632 nós. Foi considerado, nas simulações, que o produto oferece resistências ao escoamento do ar nas direções horizontal e vertical. O modelo para distribuição de ar no silo foi validado por meio de experimentos usando-se condições similares às simuladas e um fluxo de ar de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ de chapa perfurada. O sistema modelado (distribuição de ar), supracitado, foi utilizado no modelo de distribuição de temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos durante o processo de aeração. Desenvolveu-se um software, utilizando a linguagem Basic, para simular as variações de temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos de milho armazenados em silo metálicos cilíndricos durante o processo de aeração. O programa é composto de uma seção de entrada de dados e de três rotinas principais: (a) rotina para determinação da vazão de ar que afluente ou efluente de cada face dos elementos; (b) rotina para percorrer a malha de elementos; e (c) rotina para simulação das variações de temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos durante o processo de aeração. Visando, a validação do modelo de distribuição de temperatura e de teor de umidade, desenvolvido neste trabalho, grãos de milho (*Zea mays* L.), adquiridos pelo Centro de Produção da Universidade Federal de Viçosa, (safra 2000/2001), foram armazenados em um silo metálico cilíndrico, similar ao usado nas simulações. O lote continha grãos de diferentes variedades. Termopares “tipo T” (cobre-constantan) foram posicionados dentro do silo, em 11

pontos. Os valores das variáveis pertinentes ao experimento foram registrados com o auxílio de um sistema automático de aquisição de dados. Dois testes usando aeração contínua nos grãos foram executados, sendo que, antes de iniciar cada teste, a massa de grãos foi aquecida até, aproximadamente, 28 °C. Cada teste de aeração teve duração de 96 h, e durante os testes foram realizadas amostragens diárias em diversos pontos da massa de grãos, para determinação do teor de umidade. A distribuição de ar, proveniente das simulações, indicou a existência de zonas de baixa velocidade na massa de grãos, situadas na sua parte inferior, próximas ao centro do silo e à sua parede. As velocidades do ar na superfície da massa de grãos, simuladas e experimentais, tenderam a serem uniformes. A utilização da técnica de elementos finitos para a predição da distribuição do fluxo de ar, em silos providos de sistema de aeração, mostrou-se satisfatória e envolveu um erro relativo médio de 6,9%. O modelo de distribuição de temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos armazenados em silos metálicos cilíndricos, durante o processo de aeração, mostrou-se adequado. Os erros médios envolvidos na predição da temperatura e do teor de umidade foram inferiores a 9 e 6%, respectivamente. A deterioração média dos grãos, estimada pelo modelo, foi de $2,8 \times 10^{-4}\%$.

ABSTRACT

DEVILLA, Ivano Alessandro, D.S., Federal University of Viçosa, February of 2002.
Modeling of the deterioration and distributions of temperature and moisture content of stored grains in bin with aeration. Advisor: Sandra Maria Couto. Committee members: Daniel Marçal de Queiroz, Juarez de Sousa e Silva e Ricardo dos Santos Ferreira.

The general objective of this work was the modeling of the air distribution, heat and of mass transfer and deterioration in corn grains stored at a metallic bin with aeration. The specific objectives were: (a) to determine experimentally parameters involved in the models (thermal conductivity, specific heat, thermal diffusivity and bulk density); (b) to develop a finite element computational model to predict the air distribution in grains stored in a bin submitted to aeration process; (c) to develop a two-dimensional model for determination of temperature and moisture content distributions in the system during the aeration process using the results from the air distribution model; (d) to implement a model for determination of the deterioration in a mass of grains using the results obtained by the temperature and moisture content distribution model and (e) to obtain experimentally the temperature and moisture content distributions in corn grains stored at a cylindrical metallic bin with aeration seeking the validation of the models. Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) and specific heat ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) of corn samples can be expressed as a function of moisture content (U, in the range of 11.3 to 18.4% w.b.) respectively by the equations: $k = 0.0024 U + 0.127 \pm 0.004302$

and $c_p = 0.0636 U + 1.0662$. Air distribution was obtained for a system composed of a mass of corn grains (height of 1.6 m) at 13% w.b. located in a cylindrical metallic bin of 3.6 m of diameter. The system was considered symmetrical in relation to the central longitudinal axis of the bin. Airflow was introduced in the system floor through an opening simulating a perforated circular duct (width of 0.2 m). The finite element technique was used in the two-dimensional modeling of the air distribution in the bin and the system was divided in 1550 rectangular elements (1632 nodes). In the simulations it was considered that the product offers two type of airflow resistances: in the horizontal and vertical directions. The air distribution model was validated through experiments using similar conditions to the simulated ones and an airflow of $0.0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ through a perforated circular duct. The air distribution results were used as input in the model of temperature and moisture content distributions and deterioration of the grains during the aeration process. A software (Basic language) was developed to simulate temperature and moisture content variations and deterioration of the corn grains stored at cylindrical metallic bin during the aeration process. The program is composed of an input data section and three main routines: (a) routine for determination of the inlet and outlet airflow through each element face; (b) routine to travel the element mesh and (c) routine for simulation of the temperature, moisture content and deterioration of the grains during the aeration process. The temperature and moisture content distribution model was validated using experimental data. The experiments were conducted using corn grains (*Zea mays* L.) from the Production Center of the Universidade Federal de Viçosa (crop 2000/2001) stored at a cylindrical metallic bin similar to the used in the simulations. Termocouples " type T " (copper-constantan) were positioned inside of the bin at eleven locations. The mass of grains was submitted to a two continuous aeration tests and the values of the pertinent experimental variables were registered with the aid of a data acquisition system. The mass of grains was heated up to approximately 28 °C before each aeration test. The product in each test was aerated during 96 h and samples of the product were removed daily during the aeration for moisture content determinations. The simulated air distribution indicated the existence of low speed zones in the mass of

grains located at the base of the bin (close to the center and to the wall of the bin). The simulated and experimental air velocities indicate an air distribution uniform on the surface of the mass of grains. The use of the finite element technique for airflow distribution predictions in a mass of grains stored in a bin during aeration process was shown satisfactory and it involved a average relative error of 6.9%. The temperature and moisture content distributions and deterioration model implemented in this work predicted adequately the values of temperature and moisture content in a mass of grains stored at cylindrical metallic bin during the aeration process. The average relative errors involved in the temperature and moisture content predictions were inferior to 9 and 6%, respectively. The mean deterioration value of the grains estimated using the model was of $2.8 \times 10^{-4}\%$.

INTRODUÇÃO

Na safra 2001/2002, da área cultivada no Brasil (entre 38,3 e 39,2 milhões de hectares), 95,1% é utilizada por cinco grandes culturas: soja (39,4%), milho (32,2%), feijão (10,8%), arroz (8,5%) e trigo (4,1%), cujas estimativas de produção, em milhões de toneladas, são de 39,8; 38,7; 3,1; 11,1 e 2,9, respectivamente (CONAB, 2001).

Atualmente, a qualidade dos grãos tem se tornado um aspecto muito importante, tanto para a comercialização interna como para exportação. A qualidade do grão depende de uma série de fatores, como características da espécie e da variedade, condições ambientais durante seu desenvolvimento, época e procedimento de colheita, métodos de secagem e práticas de armazenagem.

No armazenamento de grãos, 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 armazenados está relacionada, principalmente, ao teor de umidade e à temperatura do produto. Segundo ABE et al. (1996), o conhecimento da distribuição de temperatura e umidade nos produtos armazenados não só ajuda a identificação da atual deterioração do produto, mas, também, indica o potencial de deterioração do mesmo. 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.

Desta forma, para aumentar a produção de alimentos, necessariamente há que se incrementar as condições para uma armazenagem segura dos grãos. Para isto são requeridas técnicas adequadas que reduzam, a níveis aceitáveis, o processo de deterioração que, por ser altamente dependente da temperatura e da umidade dos grãos, está relacionado com a respiração do produto e de microorganismos que o acompanham (SAUER, 1992; THOMPSON, 1972; STEELE et al., 1969).

A aeração é uma técnica muito empregada na prevenção ou solução de problemas de conservação dos grãos armazenados. Seus principais objetivos são: resfriar, uniformizar a temperatura, prevenir o aquecimento e o umedecimento e promover remoção de odores na massa de grãos (SILVA et al., 2000; NAVARRO et al., 2000)

O uso adequado da aeração em uma massa de grãos armazenada é de fundamental importância para se manter a qualidade do produto, além de reduzir o custo da armazenagem. A temperatura e o teor de umidade podem ser reduzidos com a aeração, tendo-se por consequência menor deterioração dos grãos.

A previsão da variação de temperatura e teor de umidade dos grãos armazenados em silo providos de sistema de aeração é um assunto complexo, pois depende de inúmeros fatores externos e internos ao silo. A modelagem matemática de um processo é uma ferramenta importante para prever o comportamento de um sistema. Permite determinar a influência de variáveis pertinentes ao processo, utilizando-se um número mínimo de experimentos e com uma maior rapidez na obtenção dos resultados.

Devido a importância do conhecimento da variação de temperatura e teor de umidade de uma massa de grãos armazenados em silos durante o processo de aeração, este trabalho teve como objetivo geral a modelagem da distribuição de ar, de transferência de calor e de massa e da deterioração em um sistema

constituído de grãos de milho armazenados em um silo metálico provido de aeração. Como objetivos específicos, pretende-se:

(a) Desenvolver, utilizando a técnica de elementos finitos, um modelo computacional, bidimensional, para prever a distribuição de ar no interior de uma massa de grãos sob aeração;

(b) Implementar um modelo bidimensional para determinação da distribuição de temperatura e de umidade no sistema durante o processo de aeração usando os resultados a serem obtidos pelo modelo de distribuição de ar;

(c) Implementar um modelo para determinação da deterioração da massa de grãos utilizando os resultados a serem obtidos pelo modelo de distribuição de temperatura e umidade;

(d) Determinar, experimentalmente, os parâmetros envolvidos no modelo:

- propriedades físicas relacionadas com a transferência de calor no produto (massa específica, calor específico, difusividade térmica e condutividade térmica);

(e) Obter, experimentalmente, as variações de temperatura e de umidade, em uma massa de grãos de milho armazenada em um silo metálico cilíndrico, dotado de aeração visando a validação dos modelos.

LITERATURA CITADA

- ABE, T.; BASUNIA, M.A. Simulation of temperature and moisture changes during storage of rough rice in cylindrical bins owing to weather variability. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, n. 65, p. 223-233, 1996.
- CONAB. Indicadores da agropecuária. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, **Brasília**, Ano X, nº 11, 2001, 50p.
- NAVARRO, S.; NOYES, R.; ARMITAGE, D.; MAIER, D.E. Objectives of aeration. In: NAVARRO, S.; NOYES, R. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. Florida: CRC Press, 2000. p. 261 – 277.
- SAUER, D.B. **Storage of cereal grains and their products**. St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, Inc. 1992. 615p.
- SILVA, J.S.; LACERDA FILHO, A.F.; DEVILLA, I.A. Aeração de grãos armazenados. In: SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, MG: Editora Aprenda Fácil, 2000. p. 261 – 277.
- STEELE, J.L.; SAUL, R.A.; HUKILL, W.V. Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.12, n. 5, p. 685 - 689, 1969.
- THOMPSON, T.L. Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v. 15, n. 2, p. 333 - 337, 1972.

CAPÍTULO 1

PROPRIEDADES TÉRMICAS DE GRÃOS DE MILHO

RESUMO

Neste trabalho foram determinadas as principais propriedades térmicas do milho (calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica), em função do teor de umidade. O método do cilindro, teoricamente infinito, com uma fonte linear de calor, foi usado para a determinação da condutividade e difusividade térmica do produto. A condutividade térmica dos grãos de milho variou de 0,1540 a 0,1712 $\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, a difusividade térmica de $9,24 \times 10^{-8}$ a $1,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e o calor específico de 1,78 a 2,24 $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, para os teores de umidade na faixa de 11,3 a 18,4% b.u.

Palavras-chave: calor específico, condutividade térmica, difusividade térmica

THERMAL PROPERTIES OF CORN GRAINS

ABSTRACT

The corn thermal properties (specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity) as a function of moisture content were determined in this work. The method of the cylinder, theoretically infinite, with a linear heat source was used for conductivity and diffusivity determinations. For samples with moisture content ranging from 11.3 to 18.4% w.b., the ranges of the thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat values for the product were 0.1540 to 0.1712 $\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, 9.24×10^{-8} to $1.35 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and 1.78 to 2.24 $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectively.

Key words: specific heat, thermal conductivity, thermal diffusivity

INTRODUÇÃO

A transferência de calor numa massa de grãos é um processo sempre presente durante a secagem e o armazenamento de um produto e ocorre principalmente por condução e por convecção. Calor é transferido por condução entre grãos, através de seus pontos de contato, e, também, entre os grãos e o ar intergranular. Transferência de calor por convecção pode ocorrer de uma seção da massa de grãos para outra em decorrência do fluxo de ar intergranular, motivada por diferença de temperatura entre os pontos da massa de grãos ou pelo movimento forçado de ar através do produto.

A modelagem da transferência de calor em produtos requer o conhecimento de algumas de suas propriedades térmicas, cujos valores, para grãos brasileiros, são informações escassas. Isso é um fator limitante e restringe à utilização de técnicas de modelagem físico-matemática, tanto para o processamento de produtos agrícolas e alimentícios quanto para a elaboração de projetos (SOARES, 1988).

De acordo com MOHSEIN (1980), ROSSI e ROA (1980) e FANG et al. (1997), a predição de mudanças de temperatura no interior de um produto ou em uma massa granular, durante sua secagem e seu armazenamento, requer a determinação das seguintes propriedades térmicas: calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica. Essas propriedades são influenciadas pelo teor de umidade do produto, temperatura, composição, densidade e porosidade (STOLF, 1972; PARK et al., 1997).

As propriedades térmicas de uma massa granular envolvem propriedades dos grãos e do ar intergranular, ou seja, deve-se considerar uma determinação aparente destas propriedades (ROSSI et al., 1982).

A transferência de calor em grãos e frutos é um processo complexo, devido à heterogeneidade desses materiais; variam em estrutura celular, composição química e conteúdos de água e ar.

CHANG (1986) obteve uma relação linear entre a densidade aparente de amostras de diferentes tipos de grãos (milho, sorgo e trigo), em diferentes teores de umidade, e os valores de suas condutividades térmicas. Comportamento semelhante tem sido observado com relação ao efeito da temperatura e do teor de umidade sobre os valores da condutividade e da difusividade térmica. Entretanto, alguns pesquisadores têm obtido relações quadráticas (WRATTEN et al., 1969; CHANDRA

e MUIR, 1971; SREENARAYANAN e CHATTOPADHYAY, 1986; DUTTA et al., 1988; ZURITZ et al., 1989; ALAGUSUNDARAM et al., 1991; FANG et al., 1997).

Segundo MOHSENIN (1980), a influência da estrutura celular, da densidade e da umidade de um produto nos valores da condutividade e da difusividade térmica é maior do que a da temperatura.

Os métodos utilizados para se determinar a condutividade térmica de um produto baseiam-se na análise de sistemas (com determinada forma geométrica) submetidos a determinadas condições que propiciem uma transferência de calor, em regime permanente ou transiente. Os valores da condutividade de uma amostra (sistema) são obtidos por meio da solução da equação diferencial, que rege o problema, e de dados experimentais relacionados com a transferência de calor no sistema investigado. PARK et al. (1999) relatam que métodos baseados em transferência de calor em regime transiente possuem a grande vantagem de requererem menor tempo de teste e apresentarem maior precisão dos resultados. Métodos baseados em regime permanente, geralmente não são apropriados para produtos biológicos, pois requerem um longo intervalo de tempo para as determinações, podendo ocorrer migrações de umidade.

Segundo REIDY e RIPPEN (1971), para a determinação da condutividade térmica de uma amostra, usando um regime permanente, a transferência de calor é analisada, usualmente, nos seguintes sistemas: placas paralelas (JIANG et al., 1986), cilindro concêntrico (PARK et al., 1999) e esfera concêntrica. Grande parte dos valores de condutividade térmica disponíveis na literatura foram obtidos utilizando-se a análise de sistemas em regime permanente.

Em termos dos métodos transientes, os sistemas mais usados para determinação da condutividade térmica baseiam-se em bloco infinito (KAZARIAN e HALL, 1965), cilindro infinito (CHANDRA e MUIR, 1971; POULSEN, 1982) e esfera (WATTS e BILANSKI, 1973).

REIDY e RIPPEN (1971) relatam que, dentre os métodos transientes usados para a determinação das propriedades térmicas, o mais adequado para grãos é o método do cilindro, teoricamente infinito, com fonte linear de aquecimento. Por várias décadas, muitos pesquisadores têm usado este método (HOOPER e LEPPER, 1950; DICKERSON, 1965; MUIR e CHANDRA, 1970; 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, ANDRADE et al., 2000, AFONSO JÚNIOR, 2001).

A transferência de energia térmica em grãos ocorre, normalmente, durante os processos de aquecimento ou resfriamento, aos quais estes ficam submetidos, e envolve o acúmulo ou a dissipação de calor, que resultam em variações temporais na distribuição de temperatura do material. A taxa na qual o calor é difundido, para dentro ou fora do material, é dependente da difusividade térmica do produto (PABIS et al., 1988). Estudos realizados por KAZARIAN e HALL (1965) confirmam que a magnitude da difusividade térmica influencia a cinética de secagem de grãos agrícolas. A difusividade térmica está relacionada com a velocidade de propagação ou difusão de calor em um material. O teor de umidade do produto, a temperatura, a porosidade e a composição do material exercem influência nos valores da difusividade térmica.

Vários são os métodos usados para a determinação do calor específico de materiais biológicos: processo das misturas, calorímetro de varredura diferencial, bomba calorimétrica e calorimetria do gelo (WRATTEN et al., 1969; CHAKRABARTI e JOHNSON, 1972; MOHSENIN, 1980). Esses métodos baseiam-se no equilíbrio térmico estabelecido entre um material, sob investigação, e um segundo corpo (de calor específico conhecido), geralmente água ($4,186 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) ou tolueno ($1,630 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

O calor específico de uma amostra pode, também, ser determinado, quando se conhecem valores da condutividade térmica, da difusividade térmica e da massa específica do produto, usando-se a expressão:

$$C_p = \frac{k}{\rho_{ap}\alpha} \quad (1)$$

em que,

C_p = calor específico do produto, $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

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

ρ_{ap} = massa específica aparente do produto, kg m^{-3} ;

α = difusividade térmica do produto, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Muitos pesquisadores estudaram o comportamento do calor específico com a variação do teor de umidade de vários materiais biológicos e observaram que o

aumento do teor de umidade provoca elevação dos valores de calor específico (SHARMA e THOMPSON, 1973; MOURA et al., 1998; CORRÊA et al., 2000). Diversos autores têm relatado a existência de um comportamento linear do calor específico em função do teor de umidade em vários produtos agrícolas (DUNCAN et al., 1968; WRIGHT e PORTERFIELD, 1970; MUIR e VIRAVANICHAJ, 1972; ALMEIDA, 1979; ROSSI et al., 1982).

ANDRADE (2001) utilizou amostras de grãos de milho e o método do cilindro infinito com uma fonte linear de calor para determinar a condutividade e a difusividade térmica do produto em função do teor de umidade. Os valores destas grandezas, juntamente com os da massa específica aparente, foram usados na equação (1) para a determinação do calor específico das amostras.

De acordo com o exposto, este trabalho teve como objetivo a determinação da condutividade térmica, da difusividade térmica e do calor específico de grãos de milho em função do teor de umidade do produto.

MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi realizada na área de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas (Departamento de Engenharia Agrícola), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

Foram utilizados grãos de milho (*Zea mays* L.), safra 2000/2001, adquiridos pelo Centro de Produção da Universidade Federal de Viçosa. O produto com teor de umidade de 21% b.u. foi acondicionado em sacos plásticos e armazenado em uma câmara B.O.D., cuja temperatura era de aproximadamente 5°C. Os grãos de milho apresentavam-se misturados e, dessa forma, não foi possível determinar a variedade ou o híbrido utilizado neste trabalho.

Amostras do produto com cinco teores de umidade (18,4; 16,6; 15,6; 12,8 e 11,6% b.u.) foram obtidas por processo de secagem com ventilação natural. A redução do teor de umidade de cada amostra, com o decorrer do tempo de secagem, foi acompanhada pela perda de sua massa, utilizando-se de uma balança com precisão de 0,01 g. Os teores de umidade, inicial e final, do produto foram determinados pelo método padrão da estufa, 105 ± 3 °C por 24 horas, em três repetições, de acordo com Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992). Ao

término de cada tratamento de secagem, as amostras foram homogeneizadas e, logo após, determinadas as propriedades térmicas.

A condutividade térmica de cada amostra de milho e a sua difusividade foram determinadas usando-se o método do cilindro, teoricamente infinito, com uma fonte de calor linear e central, segundo metodologia descrita por ANDRADE (2001). Um esquema do cilindro e dos outros equipamentos utilizados nos experimentos é apresentado na Figura 1.

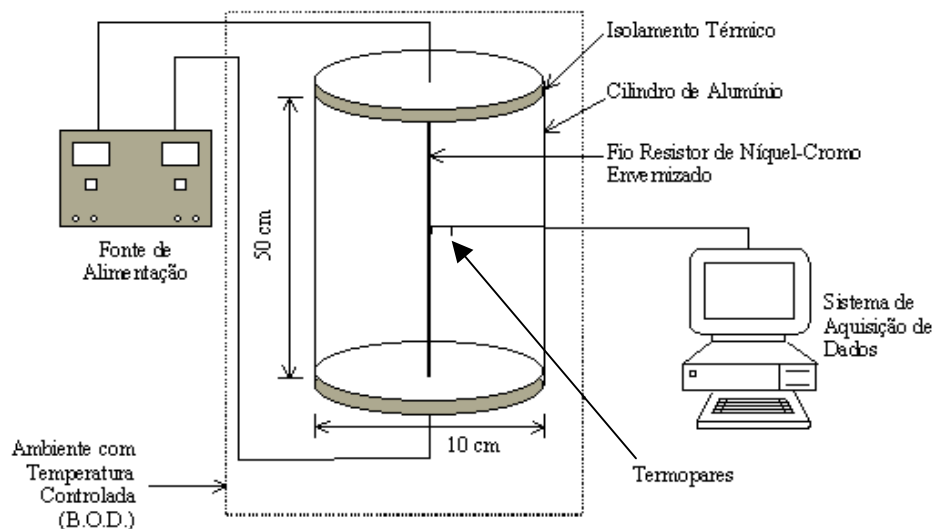


Figura 1 – Esquema dos equipamentos utilizados para a determinação das propriedades térmicas.

O cilindro de alumínio, onde a amostra de milho foi acomodada, continha no centro um fio condutor de níquel-cromo (resistência, em torno, de $4,16 \Omega \text{ m}^{-1}$), protegido por uma camada de verniz, pelo qual fez-se circular uma corrente elétrica de 0,9 A, a uma diferença de potencial de, aproximadamente, 2,1 V.

Antes de iniciar a determinação das propriedades térmicas, o produto foi submetido às seguintes etapas: (a) permanência em uma câmara B.O.D. a 20°C , acondicionado em sacos plásticos, por um período mínimo de 12 horas, para atingir o equilíbrio térmico com o ambiente; (b) foi amostrado para a determinação do teor de umidade e da massa específica; (c) foi transferido para o interior do cilindro de alumínio, com o auxílio de um funil; (d) o sistema (cilindro e grãos) era transferido para dentro da câmara onde permanecia até atingir, novamente, o equilíbrio térmico; e (e) energia foi fornecida ao fio resistor e, simultaneamente, iniciava-se a aquisição dos dados de temperatura no sistema.

As temperaturas em pontos no interior do sistema, determinadas por dois termopares situados a meia altura do cilindro, foram registradas a cada segundo. O primeiro termopar foi instalado junto ao fio resistor e o segundo, na massa de grãos, distante um centímetro do primeiro. Os dados de variações temporais de temperatura provenientes do primeiro e do segundo termopares foram usados para a obtenção dos valores da condutividade e difusividade das amostras, respectivamente.

A condutividade térmica da massa de milho foi obtida por meio da equação (2), usada por ANDRADE (2001), em que foram introduzidos os valores das temperaturas T_1 e T_2 , determinadas pelo primeiro termopar, nos tempos t_1 e t_2 , respectivamente.

$$k = \frac{Q}{4 \pi (T_2 - T_1)} \cdot \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2)$$

em que,

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

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

Os valores da difusividade das amostras foram obtidos por meio da equação (3) (ANDRADE, 2001), introduzindo-se os valores de condutividade obtidos pela equação (2) e variações temporais de temperatura determinadas pelo segundo termopar.

$$\alpha = \frac{e^{\left(\frac{4 \Delta T \pi k}{Q} + \gamma \right)}}{4t} r^2 \quad (3)$$

em que,

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

ΔT = diferença de temperatura, $^\circ C$;

γ = constante de Euler = 0,5772;

t = tempo, s;

r = raio do ponto de medida em relação ao centro do cilindro, m.

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

Após a obtenção da condutividade térmica, da difusividade térmica e da massa específica do produto, determinou-se o calor específico da massa de grãos por meio da equação (1).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

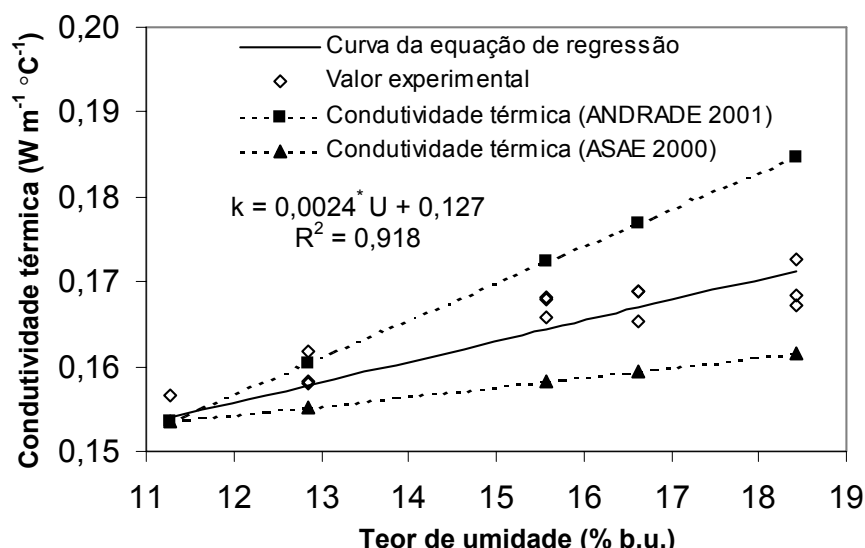
Os valores de condutividade térmica (repetições e médias) das amostras em diferentes teores de umidade, obtidos neste trabalho, são apresentados na Figura 2. Os valores desta grandeza variaram de 0,151 a 0,1695 $W m^{-1} °C^{-1}$. Nesta figura, encontram-se, também, a equação de regressão ajustada aos dados experimentais para expressar a condutividade em função do teor de umidade, com a respectiva curva, e valores médios experimentais desta grandeza extraídos da ASAE (2000) e de ANDRADE (2001).

Verifica-se que os valores da condutividade térmica crescem linearmente com o aumento do teor de umidade das amostras. Os valores de condutividade térmicos das amostras de grãos, obtidos neste trabalho, são próximos aos valores apresentados pela ASAE (2000) e por ANDRADE (2001), entretanto são superiores aos primeiros e inferiores aos últimos. Apesar de os produtos utilizados por ANDRADE (2001) e neste trabalho serem brasileiros, as variedades eram diferentes: os grãos de milho usados pelo pesquisador eram da variedade “Vencedor”, enquanto neste trabalho foram usadas variedades misturadas. Isso, provavelmente, tenha contribuído para a diferença existente entre os valores de condutividade térmica provenientes dos dois trabalhos.

Na Tabela 1, são apresentados valores de parâmetros considerados relevantes à caracterização do produto utilizado neste trabalho. A dimensão dos grãos influencia a porosidade da massa. A porosidade pode afetar a determinação das propriedades térmicas dos grãos, devido aos espaços junto aos termopares. Dessa forma, os termopares poderiam medir a temperatura do ar intersticial e não a temperatura dos grãos.

Para a determinação da difusividade térmica das amostras de milho, neste trabalho foram usados dados de temperatura correspondentes a um intervalo de tempo de 1.100 a 1.900 s, conforme recomendado por CARSLAW e JAEGER (1959) e comprovado por ANDRADE (2001). Os valores experimentais (repetições e médias) de difusividade térmica de amostras de grãos de milho obtidos em

diferentes teores de umidade são apresentados na Figura 3. Os valores da difusividade variaram de $9,24 \times 10^{-8}$ a $1,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Podem-se observar grandes variações nos valores da difusividade das amostras testadas, principalmente naquelas com teores de umidade de 11,3; 15,6 e 16,6% b.u. Os desvios experimentais envolvidos nas determinações de amostras em 11,3; 12,8; 15,6; 16,6 e 18,4% b.u. foram, respectivamente, iguais a $0,22 \times 10^{-7}$; $0,069 \times 10^{-7}$; $0,20 \times 10^{-7}$; $0,14 \times 10^{-7}$ e $0,041 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Tentou-se ajustar modelos estatísticos para explicar o comportamento desta propriedade em função do teor de umidade, porém não se obteve sucesso. Valores da difusividade térmica de grãos de milho extraídos de ANDRADE (2001) e da ASAE (2000), que variaram de $8,67 \times 10^{-8}$ a $1,18 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, são, também, apresentados na Figura 4. Os valores médios obtidos neste trabalho são inferiores aos do pesquisador e superam os da instituição.



* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

Figura 2 – Valores experimentais e estimados da conduktividade térmica de grãos de milho em função do teor de umidade.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos grãos de milho

Propriedades	Milho
Teor de umidade (% b.u.)	13
Dimensões principais	
- Comprimento (mm)	$10,5 \pm 0,8$
- Largura (mm)	$8,7 \pm 0,6$
- Espessura (mm)	$4,4 \pm 0,5$
Massa específica aparente	$733,1 \pm 2,7$
Massa específica real (kg m^{-3})	$1264,02 \pm 6,2$
Porosidade calculada (%)	42

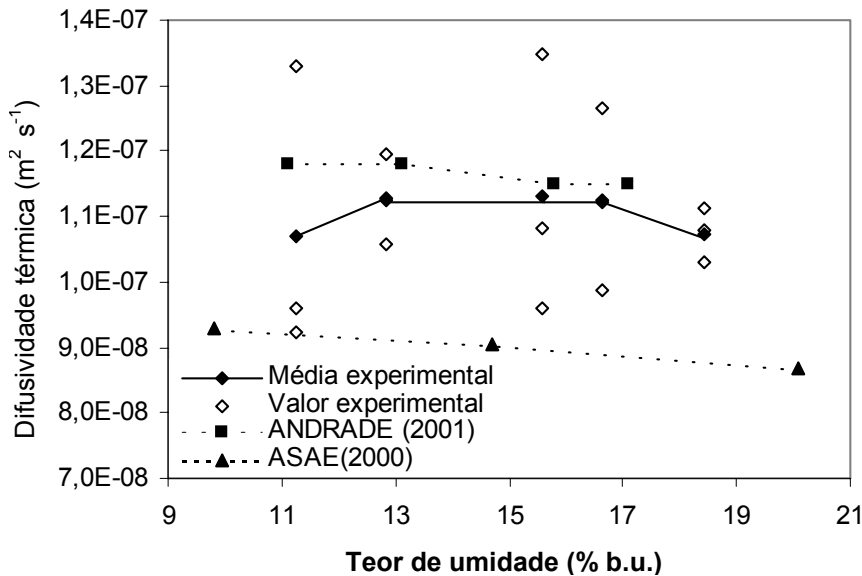
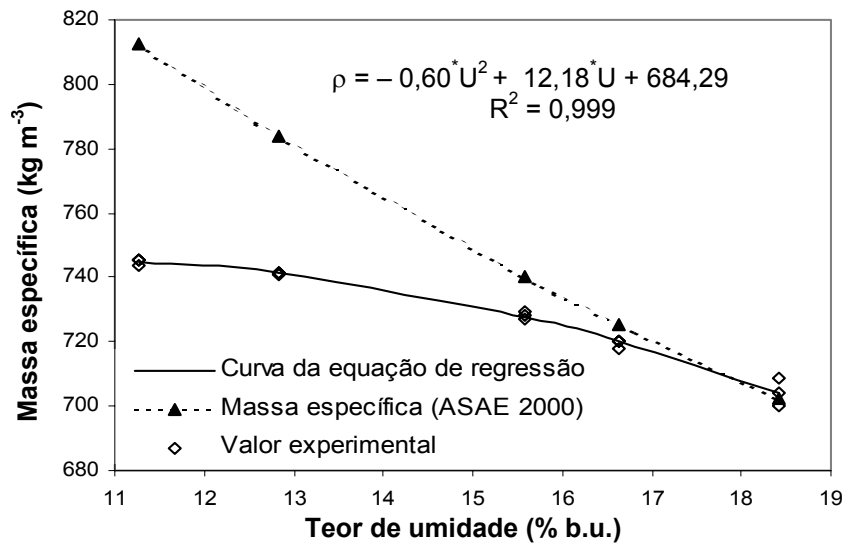


Figura 3 – Valores experimentais da difusividade térmica de grãos de milho a diferentes teores de umidade.

Os valores, provenientes de três determinações, da massa específica aparente de amostras de milho em diferentes teores de umidade são apresentados na Figura 4. A equação de regressão e a respectiva curva, ajustada para descrever o comportamento desta grandeza em função do teor de umidade, são apresentadas, também, nesta figura. Observa-se uma relação não-linear entre a massa específica e o teor de umidade do produto. À medida que se reduz a umidade dos grãos, verifica-se um aumento na massa específica, o que pode ser explicado por maior contração da amostra de grãos, em relação à redução de massa, durante a secagem do produto. Os resultados experimentais obtidos encontram-se próximos aos apresentados pela ASAE (2000), em teores de umidade superiores a 15% b.u.

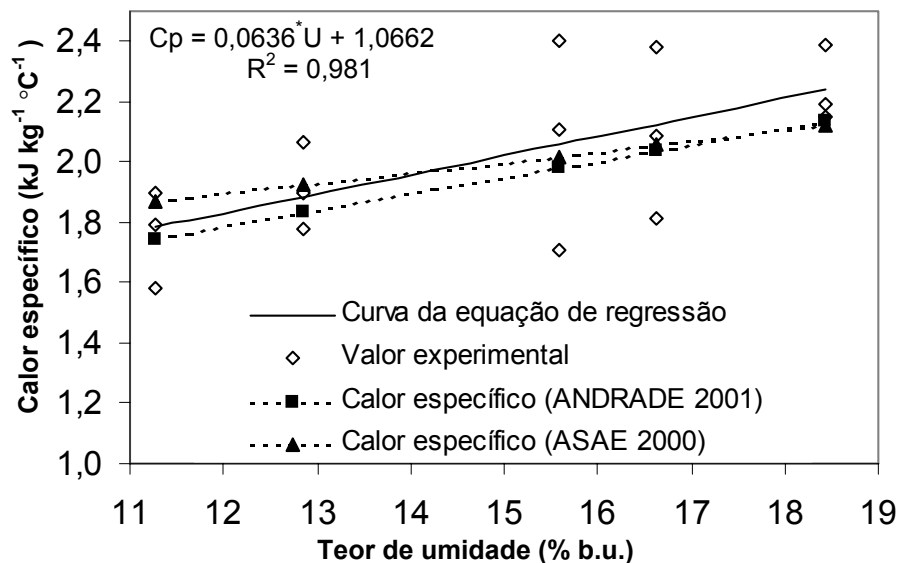
Os valores médios de calor específico das amostras de grãos de milho, em diferentes teores de umidade, são apresentados na Figura 5. Os desvios envolvidos nas determinações desta grandeza variaram de 129,1 a 348,6 $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, tendo um valor médio igual a 213,4 $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. A equação de regressão ajustada e a respectiva curva, para descrever o calor específico em função do teor de umidade do produto, são apresentadas, também, nesta figura. Nota-se que o calor específico aumentou linearmente à medida que o teor de umidade se elevou. Além disso, pode-se observar que os resultados obtidos com os teores de umidade de 15,6; 16,6 e 18,4% b.u. foram superiores aos resultados de ASAE (2000) em 1,8; 3,1 e 5,2%,

respectivamente. Os resultados obtidos foram, também, superiores ao determinados por ANDRADE (2001), conforme visualização na Figura 5.



* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

Figura 4 - Valores experimentais e estimados da massa específica aparente de grãos de milho em função do teor de umidade.



* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

Figura 5 – Valores experimentais e estimados do calor específico de grãos de milho em função do teor de umidade.

CONCLUSÕES

As análises dos dados e a interpretação dos resultados do estudo do efeito do teor de umidade sobre as propriedades térmicas dos grãos de milho permitiram as seguintes conclusões:

1 - os valores de calor específico e condutividade térmica de grãos de milho, em função do teor de umidade do produto, comportam-se de forma similar à da maioria dos produtos agrícolas já estudados, ou seja, aumentam à medida que se eleva o teor de umidade;

2 - a condutividade térmica (k) de amostras de milho, em função do teor de umidade (U), para uma faixa de 11,3 a 18,4% b.u., pode ser expressa por $k = 0,0024 U + 0,127 \pm 0,004302 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

3 - a difusividade térmica de amostras de milho variou de $9,24 \times 10^{-8}$ a $1,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$;

4 - a massa específica aparente (ρ) de amostras de milho, em função do teor de umidade (U), para uma faixa de 11,3 a 18,4% b.u., pode ser expressa por $\rho = -0,60 U^2 + 12,18 U + 684,29$ com $R^2 = 0,999 \text{ kg m}^{-3}$; e

5 - o calor específico de amostras de milho (C_p), em função do teor de umidade (U), para uma faixa de 11,3 a 18,4% b.u., pode ser expresso por $C_p = 0,0636 U + 1,0662 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

LITERATURA CITADA

AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001, 384f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ALAGUSUNDARAM, K.; JAYAS, D.S.; MUIR W.E.; WHITE, N.D.G. Thermal conductivity of barley, lentils and peas. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 34, n. 5, p. 1784-1788, 1991.

ALMEIDA, B.V. **Determinação de propriedades físicas de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao*, L.)**. 1979, 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE, E.T.; CORREA, P.C.; AFONSO JUNIOR, P.C. Propriedades térmicas da massa granular de milheto (*Penisetum americanum* (L.) Leeke). In: **Avances en Ingenieria Agrícola**. Buenos Aires: Facultad de Agronomía, 2000, p. 545-550.

- ANDRADE, E. T. **Simulação da variação de temperatura em milho armazenado em silo metálico**. 2001, 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ASAE. American Society of Agricultural Engineers. **Agricultural Engineers Yearbook**. St. Joseph: Michigan, 2000. 796p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**, Brasília, DF, 1992. 365p.
- CARSLAW, H.S.; JAEGER, N.C. **The conduction of heat in solids**. 2^o edition. London: Oxford University Press, 1959, 510p.
- CHAKRABARTI, S.M.; JOHNSON, W.H. Specific heat of flue cured tobacco by differential scanning calorimetry. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 15, n. 5, p. 928-931, 1972.
- CHANDRA, S.; MUIR, W.E. Thermal conductivity of spring wheat at low temperature. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 14, n. 2, 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. 1447-1450, 1986.
- CORRÊA, P.C.; SAMPAIO, C.P.; REGAZZIA.J.; AFONSO JÚNIOR, P.C. Calor específico dos frutos do café de diferentes cultivares em função do teor de umidade. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, n.1, p.18-22, 2000. Edição especial.
- DICKERSON, R.W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, Chicago, p.198-204, may. 1965.
- 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.
- DUNCAN, G.A.; BUNN, J.M.; HENSON, W.H. Specific heat of burley tobacco during the cure. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 11, n. 4, p. 480-483, 1968.
- DUTTA, S.K.; NEMA, V.K.; BHARDWAJ, R.K. Thermal properties of grains. **Journal Agricultural Engineering Research**, London, v. 39, n. 4, p. 269-275, 1988.
- FANG, Q.; LAN, Y.; KOCHER, M.F.; HANNA, M.A. **Thermal conductivity of granular starch materials**. St. Joseph: ASAE, 1997. 18 p. (Paper n.97-6014).
- HOOPER, F.C.; LEPPER, F.R. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. **Transactions ASHVE**, [S.I.], v. 56, p. 309-322, 1950.
- JASANSKY, A.; BILANSKI, W.K. Thermal conductivity of whole and ground soybeans. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 16, n. 1, p. 100-103, 1973.

- JIANG, S.; JOFRIET, J.C.; MITTAL, G.S. Thermal properties of hayalage. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 29, n. 2, p. 601-606, 1986.
- KAZARIAN, E.A.; HALL, C.W. Thermal properties of grains. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 8, n. 1, p. 33-37, 1965.
- 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.
- MOHSEININ, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach science publishers Inc., 1980. 407p.
- MOURA, S.C.S.R.; GERMER, S.P.M.; JARDIM, D.C.P.; SADAHIRA, M.S. Thermophysical properties of tropical fruit juices. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 1, n. 1-2, p. 70-76, 1998.
- MUIR, W.E.; CHANDRA, S. **Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures**. St. Joseph. ASAE, 1970. 15p. (Paper n. 70-49085).
- MUIR, W.E.; VIRAVANICHAJ, S. Specific heat of wheat. **Journal Agricultural Engineering Research**, London, v. 17, n. 4, p. 338-342, 1972.
- PABIS, S.; JAYAS, D.S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988. 303p.
- PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T.; NUNES, A.S. Determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de grãos em regime permanente. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 264-269, 1999.
- PARK, K.J.; MURR, F.E.X.; SALVADEGO, M. Medição da condutividade térmica de milho triturado pelo método da sonda. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.17, n.3, p.242-247, 1997.
- PASSOS, E.F. Condutividade térmica da pasta de mandioca. **Revista CERES**, Viçosa, MG, v. 29, n. 162, p. 222-231, 1982.
- POULSEN, K.P. Thermal diffusivity of foods measured by simple equipment. **Journal of Food Engineering**, Barking, v. 1, n. 1, p. 115-122, 1982
- 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.; 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.
- ROSSI, S.J.; FIOREZE, R.; OLIVEIRA, A.M.C.; MALZAC, H.F. Propriedades térmicas de castanha de caju e raspa de mandioca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 7, n. 1, p. 51-56, 1982.

- 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.
- SOARES, N.F.F. **Análise experimental do método de sonda para medição de condutividade térmica de grãos: Aplicação para milho (*Zea mays L.*)**. 1988, 46f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SREENARAYANAM, V.V.; CHATTOPADHYAY, P.K. Thermal conductivity and diffusivity of rice. **Journal Agricultural Engineering Research**, London, v. 34, n. 1, p. 115-121, 1986.
- STOLF, S.R. Medição da condutividade térmica dos alimentos. **Boletim do Instituto de Tecnologia de alimentos**, Campinas, v. 29, n. 1, 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.
- VOUDOURIS, N.; 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**, [S.I.], v. 27, n. 6, p. 522-532, 1994.
- WATTS, K.C.; BILANSKI, W.K. Methods for estimating the thermal diffusivity of whole soybeans. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 16, n. 1, p. 143-145, 1973.
- WRATTEN, F.T.; POOLE, W.D.; CHESNESS, J.L.; BALL, S.; RAMARAO, V. Physical and thermal properties of corn cobs. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 12, n. 5, p. 801-803, 1969.
- WRIGHT, M.E.; PORTERFIELD, J.G. Specific heat of spanish peanuts. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 13, n. 4, p. 508-510, 1970.
- ZURITZ, C.A.; SASTRY, S.K.; MCCOY, S.C.; MURAKAMI, E.G.; BLAISDELL, J.L. A modified fitch device for measuring the thermal conductivity of small food particles. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, n. 4, p. 711-718, 1989.

CAPÍTULO 2

DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE AR EM SILOS COM SISTEMA DE AERAÇÃO: ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

RESUMO

A distribuição de ar em uma massa de grãos de milho, submetida a um processo de aeração, foi obtida, neste trabalho, através de simulações, usando a técnica de elementos finitos. O produto (13% b.u.) encontrava-se armazenado em silo metálico provido de dutos circulares para aeração. A massa de grãos foi considerada um conjunto de regiões (resistências distribuídas) que oferecem diferentes resistências ao escoamento de ar nas direções horizontal e vertical (anisotropia). O modelo para distribuição de ar no silo foi validado por meio de experimentos, usando-se condições similares às simuladas com um fluxo de ar de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. A distribuição de ar, proveniente das simulações, indicou a existência de zonas de baixa velocidade na massa de grãos, situadas na sua parte inferior, próximas ao centro do silo e à sua parede. As velocidades do ar na superfície da massa de grãos, simuladas e experimentais, tenderam a ser uniformes. A utilização da técnica de elementos finitos para a predição da distribuição do fluxo de ar, em silos providos de sistema de aeração, mostrou-se satisfatória e envolveu um erro relativo médio de 6,9%.

Palavras-chave: aeração, elementos finitos, fluxo de ar, milho.

AIRFLOW DISTRIBUTION IN AERATED BINS: FINITE ELEMENT ANALYSIS

ABSTRACT

In this work the finite element technique was used to obtain the air distribution in a mass of corn kernels submitted to an aeration process. The product (13% w.b.) to be stored in metallic bin provided with a circular duct aeration system. The mass of grains was considered as being composed of

regions (distributed resistances) that offer different resistances to the airflow in the horizontal and vertical directions. The model for air distribution in the bin was validated through experiments under similar conditions to the simulate ones. The simulated air distribution indicated the existence of zones of low air velocities in the mass of grains located at the base of the bin (close to the center and to the wall of the bin). The simulated and experimental air velocities on the surface of the mass of grains showed a tendency to be uniform. The use of the finite element technique for the prediction of the airflow distribution in bins with aeration system was satisfactory and it involved a average relative error of 6.9%.

Keywords: aeration, finite element, airflow, corn.

INTRODUÇÃO

Além do esforço para aumentar a produção de alimentos, necessariamente há que se incrementarem as condições para uma armazenagem segura dos grãos. Para tal, é necessário que os grãos sejam secos e, quando necessário, sejam ventilados durante o armazenamento. Nesses procedimentos, o ar é forçado, por um ventilador, a escoar através da massa de grãos.

A deterioração de grãos armazenados, que é altamente dependente da temperatura e umidade dos grãos, está relacionada com a respiração do produto e de microorganismos que o acompanham (SAUER, 1992).

O uso adequado da aeração em uma massa de grãos armazenada é de fundamental importância para se manter a qualidade do produto, além de reduzir o custo da armazenagem. A temperatura e o teor de umidade podem ser reduzidos com a aeração, tendo-se por consequência menor deterioração dos grãos.

O sucesso dos processos de secagem e aeração depende da uniformidade de distribuição do ar no interior da massa de grãos, que, por sua vez, depende da resistência que o produto oferece à passagem do fluido (HAQUE et al., 1982; SOKHANSANJ et al., 1990; YANG e WILLIAMS, 1990; ALAGUSUNDARAM et al., 1994).

A má distribuição do ar em uma massa de grãos armazenados pode provocar o desenvolvimento de fungos em áreas onde a velocidade do ar é baixa e pode, ainda, ocasionar a supersecagem dos grãos em áreas com alta velocidade do ar.

A resistência dos grãos e das sementes ao escoamento do ar tem sido estudada por vários cientistas (SHEDD, 1951; HUKILL e IVES, 1955; JAYAS et al. 1987; GINER et al., 1996). ALAGUSUNDARAM e JAYAS (1990) apresentaram uma revisão sobre as várias equações utilizadas para determinar a resistência ao fluxo de ar oferecida por produtos agrícolas. Os autores afirmaram que vários trabalhos assumem a massa de grãos como um meio isotrópico. Porém, relatos encontrados na literatura mostram que a massa de grãos deve ser considerada como um meio anisotrópico (KUMAR e MUIR, 1986; JAYAS et al., 1987; KAY et al., 1989; SOKHANSANJ et al., 1990).

A distribuição do fluxo de ar em grãos armazenados em silos dotados de sistema de aeração tem sido modelada por MIKETINAC et al. (1986) e SINÍCIO et al. (1992) como um problema bidimensional, e por SMITH (1982) e JAYAS e MUIR (1991) como um problema tridimensional.

Técnicas numéricas têm sido amplamente usadas na resolução de problemas de escoamentos de fluidos. Dentre estas, a técnica de elementos finitos vem sendo utilizada com sucesso por vários pesquisadores para a resolução de diferentes problemas envolvendo escoamentos, por exemplo: ROJANO et al. (1998); FERGUSON (1995); GONG e MUJUMDAR (1995); LAI (1980).

Segundo MARCHANT (1976), o método de elementos finitos pode ser usado, com razoável precisão, para resolver equações que descrevem a distribuição do fluxo de ar em produtos agrícolas. O método, em comparação com as outras técnicas, possui a vantagem de resolver as equações para sistemas em qualquer forma geométrica.

MIKETINAC et al. (1986), utilizando a técnica de elementos finitos, determinaram a distribuição do fluxo de ar em silos de fundo plano e cônicos, e com diferentes dutos de distribuição do ar. Concluíram que a técnica de elementos

finitos pode ser usada para prever a distribuição do ar nos silos e determinar as zonas onde ocorre baixa velocidade do ar.

O problema de escoamento de fluidos é definido pelas leis de conservação de massa, de *momentum* e de energia. Quando se consideram as seguintes restrições: (1) o fluido é Newtoniano, (2) o fluido é incompressível, (3) não ocorre mudança de fase, (4) o escoamento é isotérmico, (5) o escoamento é permanente e (6) o domínio espacial do problema não muda com o tempo, as equações de conservação podem ser expressas como (ANDRADE et al., 2001)

- **Conservação de massa:**

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

em que,

$\vec{V} = (V_x, V_y \text{ e } V_z)$ = componentes do vetor velocidade do fluido nas direções x, y e z, respectivamente;

x, y e z = coordenadas cartesianas.

- **Equações de *momentum*:**

$$\frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \quad (4)$$

em que,

P = pressão do fluido;

ρ = densidade do fluido;

$g = (g_x, g_y \text{ e } g_z)$ = componentes da aceleração da gravidade nas direções x, y e z, respectivamente;

$\vec{R} = (R_x, R_y \text{ e } R_z)$ = representam quaisquer termos adicionais (fontes ou sorvedouros) nas direções x, y e z, respectivamente;

μ_e = viscosidade efetiva.

No método dos elementos finitos, aplicado a escoamentos de fluidos, a região espacial em estudo é dividida em elementos, conectados por pontos comuns (nós), e as equações (1), (2), (3) e (4) são discretizadas para cada elemento. O método de Galerkin, o dos resíduos ponderados (SEGERLIND, 1984), é usado na obtenção de matrizes para os elementos, que são acopladas em uma única matriz. O sistema de equações resultante é resolvido para cada grau de liberdade, obtendo-se, assim, valores de pressão e de velocidade em cada nó do sistema.

Os termos R_x , R_y e R_z , nas equações (2), (3) e (4), podem ser considerados resistências distribuídas (representações macroscópicas de geometria no interior da região em estudo) e são uma maneira conveniente de aproximar efeitos de meios porosos sem realmente modelar a sua geometria.

O presente trabalho teve por objetivo modelar, usando a técnica de elementos finitos, a distribuição de ar em grãos de milho, considerados meio anisotrópico, armazenados em silos metálicos providos de sistema de ventilação.

MATERIAL E MÉTODOS

Sistema modelado

O sistema modelado, esquematizado na Figura 1(a), consistiu de uma massa de grãos de milho (13% b.u.) contida, até a altura de 1,6 m, em um silo metálico cilíndrico de 1,8 m de raio. Escoamento de ar foi introduzido na parte inferior do sistema, através de uma abertura que simulava um duto circular perfurado (largura de 0,2 m), cuja vista superior é esquematizada na Figura 1(b). O duto foi posicionado a uma distância radial de 1,1 m do eixo de simetria.

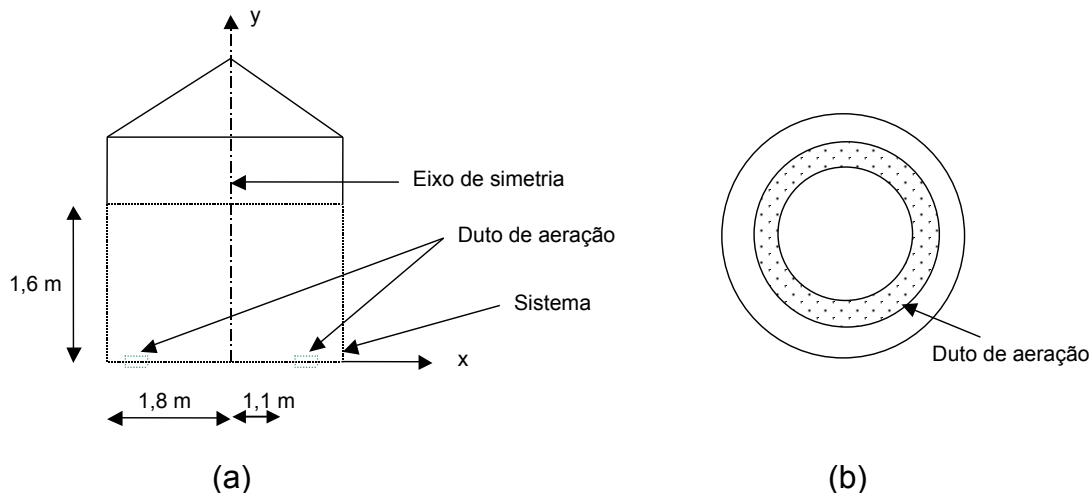


Figura 1 – (a) Esquema do sistema estudado e da condição de simetria para modelagem do fluxo de ar e (b) vista superior do duto de aeração.

Análise por elementos finitos

O método dos elementos finitos foi usado para o desenvolvimento de um programa computacional visando simular a distribuição do fluxo de ar no sistema (massa de grãos) provido de aeração. Para tal, utilizou-se o programa de modelagem por elementos finitos ANSYS, versão 5.7 (ANSYS, 2001).

O sistema foi considerado simétrico em relação ao eixo longitudinal central do silo, eixo Y. Assim, na análise do escoamento de ar no meio poroso, considerou-se, apenas, a metade da seção longitudinal da massa de grãos. O sistema foi discretizado em elementos bidimensionais do tipo FLUID141 com 4 nós, que sofreram, durante a análise, rotação em torno do eixo de simetria. O leito de grãos de milho foi considerado como uma resistência distribuída. O tipo de elemento usado permite a introdução de constantes, representativas de resistências distribuídas no seu interior, nas direções X (RDx) e Y (RDy). Nas simulações, o sistema foi submetido a um fluxo de ar de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por metro quadrado de área perfurada.

Valores das resistências RDx e RDy foram obtidos através de um processo de otimização, descrito em ANDRADE (2001). Os valores (pressão estática versus profundidade), utilizados no processo de otimização, foram obtidos pela equação (5), sugerida por ASAE (2000), para a faixa de velocidade de 0,00025 a

0,0168 m s⁻¹. A queda de pressão, na direção X, foi estimada em 45% da queda de pressão na direção Y, de acordo com KAY et al. (1989).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{aQ^2}{\ln(1+bQ)} \quad (5)$$

em que,

- ΔP = perda de carga, Pa;
- L = altura da camada, m;
- a e b = constantes que dependem do produto (para milho, a = 9770 e b = 8,55); e
- Q = fluxo de ar, m³ s⁻¹ m².

Os dados de entrada necessários à simulação da distribuição do fluxo de ar na massa de grãos foram: geometria do sistema, propriedades do ar e valores das resistências distribuídas (RD_x, RD_y). Os contornos do sistema foram submetidos às seguintes condições: (a) velocidades nulas (direções X e Y) nas paredes, (b) velocidade (conhecida na direção Y) na abertura representando o duto de aeração, (c) velocidade nula (direção X) no eixo de simetria, e (d) pressão nula na extremidade superior do sistema (referência : P = 1 atm).

Na resolução do problema, as seguintes considerações foram feitas: (a) regime permanente; (b) escoamento turbulento; (c) propriedades constantes (ar e partículas); (d) análise tridimensional; (e) os grãos de milho são tratados como resistência distribuída; (f) meio anisotrópico; (g) efeitos térmicos desprezíveis; e (h) fricção nas paredes do silo desprezível.

Validação do modelo

Um silo metálico cilíndrico de 3,6 m de diâmetro e 2,2 m de altura, com fundo totalmente perfurado, foi utilizado para validação do modelo. Um sistema de aeração, consistindo de um ventilador centrífugo com motor trifásico de 1,5 kW e um diafragma para controle da entrada do ar no ventilador, foi adaptado ao silo.

O fundo do silo perfurado foi coberto por chapas metálicas de maneira que a área para a entrada de ar fosse em forma de um anel circular, como esquematizado na Figura 1(b).

O silo metálico foi carregado com milho a 13% b.u., até a altura de 1,6 m. O carregamento foi realizado com o auxílio de uma rosca transportadora e a altura de queda do produto foi de 2,3 m. A superfície da massa de grãos foi nivelada para evitar possíveis caminhos preferenciais do ar.

Dois testes, com duração de cinco dias cada um, com um fluxo de ar de aeração de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, foram realizados visando a validação do modelo. Diariamente, as velocidades do ar em vários pontos da superfície da massa de grãos, Figura 2, foram medidas. Os pontos situados nas linhas principais encontravam-se a distâncias radiais, a partir do centro do silo, de 0,3; 0,9 e 1,5 m, e os pontos nos quadrantes, a partir do centro do silo, a distâncias radiais de 0,4 e 1,6 m.

As velocidades foram medidas por meio de um anemômetro de pás rotatórias, com faixa de leitura de 0 a 35 m s^{-1} e erro de $\pm 2\%$, devidamente calibrado. Para possibilitar a medida de velocidades baixas do ar, utilizou-se um dispositivo metálico com forma de um tronco de cone, o qual foi colocado na superfície da massa. O dispositivo possuía uma altura de 0,45 m e suas aberturas, inferior e superior, tinham diâmetros de 0,40 e 0,0254 m, respectivamente. A velocidade na superfície da massa de grãos foi calculada com base no princípio da conservação da massa.

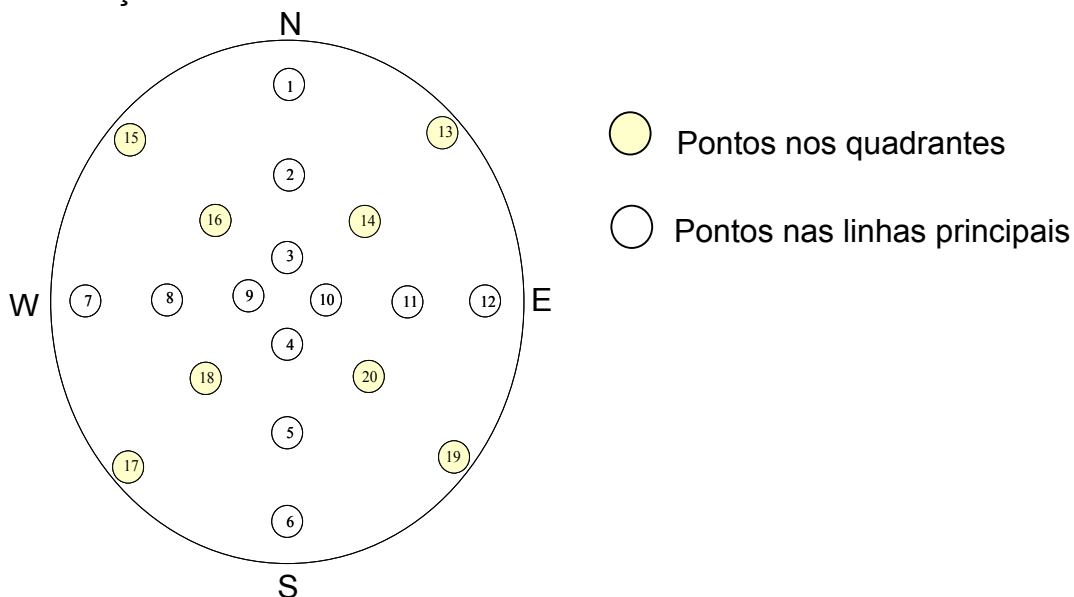


Figura 2 – Esquema dos pontos de medição da velocidade do ar na massa de grãos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema investigado foi discretizado, como mostrado na Figura 3, em 1.550 elementos, resultando em 1.632 nós.

Aos valores obtidos para as resistências distribuídas em função da velocidade do ar, após o processo de otimização, foram ajustadas equações polinomiais de primeiro grau, cujos coeficientes são apresentadas na Tabela 1, acompanhados dos respectivos coeficientes de variação (R^2).

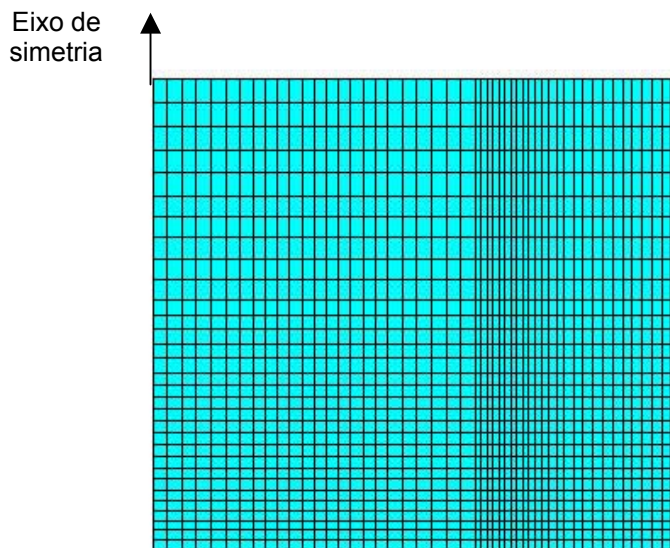


Figura 3 – Malha para análise por elementos finitos.

Tabela 1 – Coeficientes das equações ajustadas ($RD = A + B V$) para expressar a resistência distribuída (RD) em função da velocidade do ar (V)

Resistência distribuída	A	B	R^2
RDx	28391986	117051172*	0,998
RDy	63057219	261521190*	0,999

* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

Inicialmente, foram atribuídos, aos elementos situados sobre o duto de aeração, valores de resistência distribuída máxima na direção Y e mínima na direção X, devido ao escoamento de ar na saída do duto de aeração, que provoca a maior perda de carga na direção Y. Aos demais elementos, atribuíram-se

valores médios de resistência nas duas direções. O programa computacional foi, então, executado, e as distribuições de velocidade nas direções X e Y foram determinadas.

Os resultados obtidos, Figuras 4 e 5, nesse primeiro procedimento foram usados como um guia para a divisão do sistema em diferentes regiões, conforme apresentado na Figura 6. Consideram-se, como critério para a divisão das regiões, as faixas de velocidade. Um processo iterativo foi implementado com o objetivo de determinar valores adequados de resistências distribuídas para cada região. Este processo consistiu das seguintes etapas: (1) obter a velocidade média do ar, nas direções X e Y, em cada região; (2) usando esses valores de velocidade, determinar as resistências distribuídas (RDx e RDy) para cada região, através das equações expostas na Tabela 1; (3) introduzir no sistema os novos valores de resistências, executar o programa computacional e obter a nova distribuição de velocidade nas direções X e Y; e (5) comparar a nova distribuição de velocidades com aquela obtida anteriormente. Se a diferença entre as velocidades for maior que $|1 \times 10^{-5}| \text{ m s}^{-1}$, retornar à etapa 1 do processo. Caso contrário, os valores atribuídos para as resistências distribuídas de cada região são considerados como os mais prováveis.

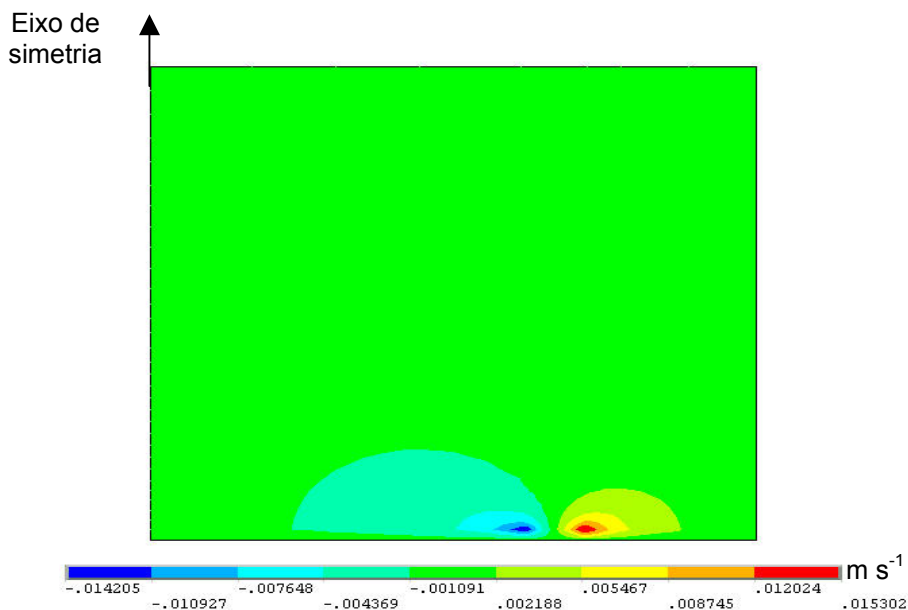


Figura 4 – Distribuição de velocidades na direção X.

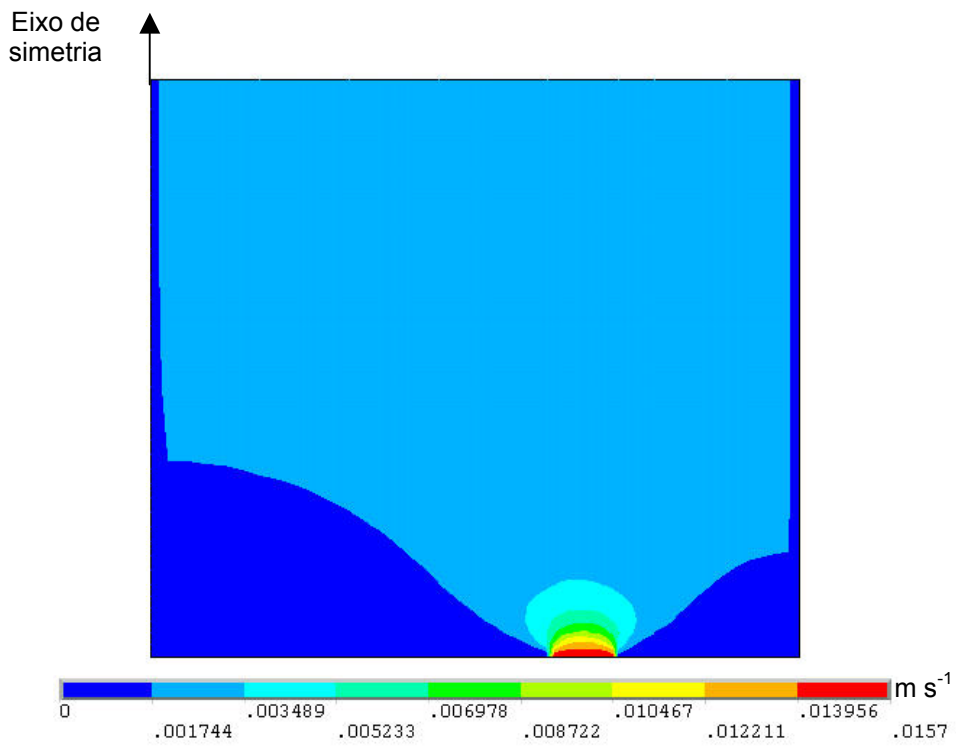
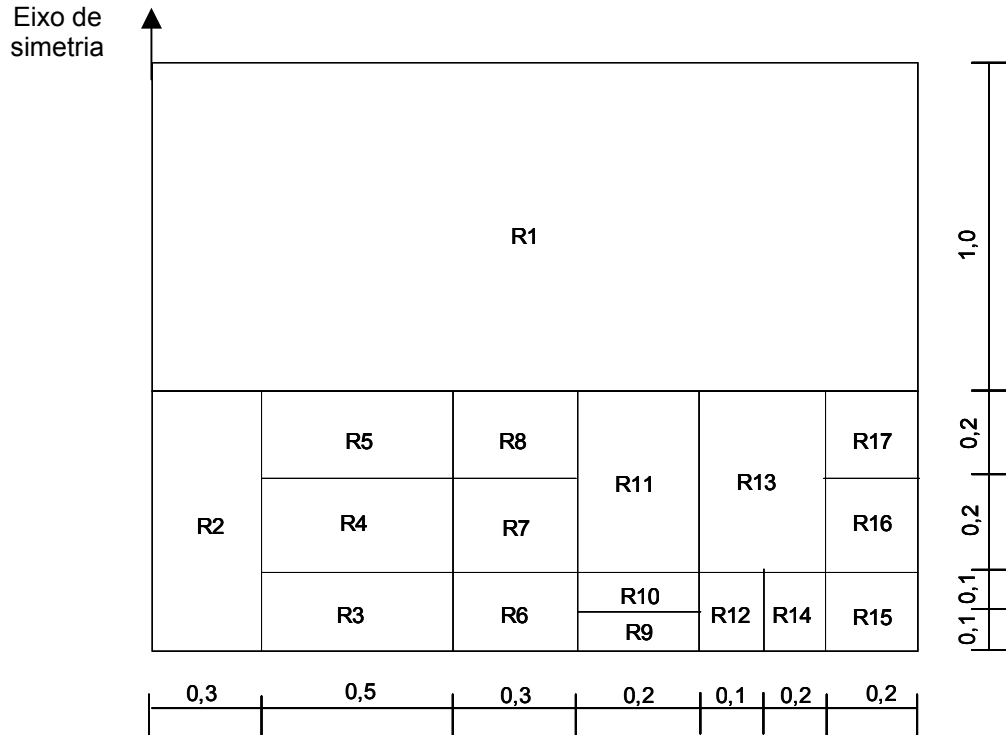


Figura 5 – Distribuição de velocidades na direção Y.



*Comprimento em metros

Figura 6 – Esquema da divisão do sistema em regiões.

Os valores usados para as resistências distribuídas nas direções X e Y, representativas do meio poroso, para cada região, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resistências distribuídas nas direções X e Y em diferentes regiões do sistema modelado

Região	RDx $\times 10^7(\text{m}^{-2})$	RDy $\times 10^7(\text{m}^{-2})$
1	2,8582	6,3741
2	2,8582	6,3285
3	2,8672	6,3285
4	2,8612	6,3399
5	2,8582	6,3627
6	2,8892	6,3665
7	2,8612	6,3741
8	2,8582	6,3741
9	2,9340	6,6023
10	2,8676	6,4198
11	2,8582	6,3741
12	2,9054	6,3741
13	2,8582	6,3741
14	2,8776	6,3399
15	2,8582	6,3285
16	2,8582	6,3627
17	2,8582	6,3741

A distribuição do vetor velocidade do ar, obtida pela análise do escoamento de ar no sistema usando a técnica de elementos finitos, quando o sistema foi submetido ao fluxo de ar de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, é mostrada na Figura 7. Verifica-se que, no fundo do silo, próximo à sua parede e ao eixo de simetria, há áreas onde a velocidade do ar é muito baixa, proporcionando zonas com pouca aeração. Este fato é preocupante, pois, nessas zonas, o baixo fluxo de ar pode dificultar o resfriamento dos grãos. Observa-se, ainda, uma distribuição uniforme da velocidade do ar na superfície da massa de grãos.

Quando o sistema foi submetido ao fluxo $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por metro quadrado de área perfurada, observou-se que, na região vizinha ao duto, havia vetores velocidade cujos módulos eram superiores a $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, e que a direção destes vetores era predominantemente, próxima da horizontal. Este fato se deve, provavelmente, à menor resistência oferecida pela massa de grãos nesta direção.

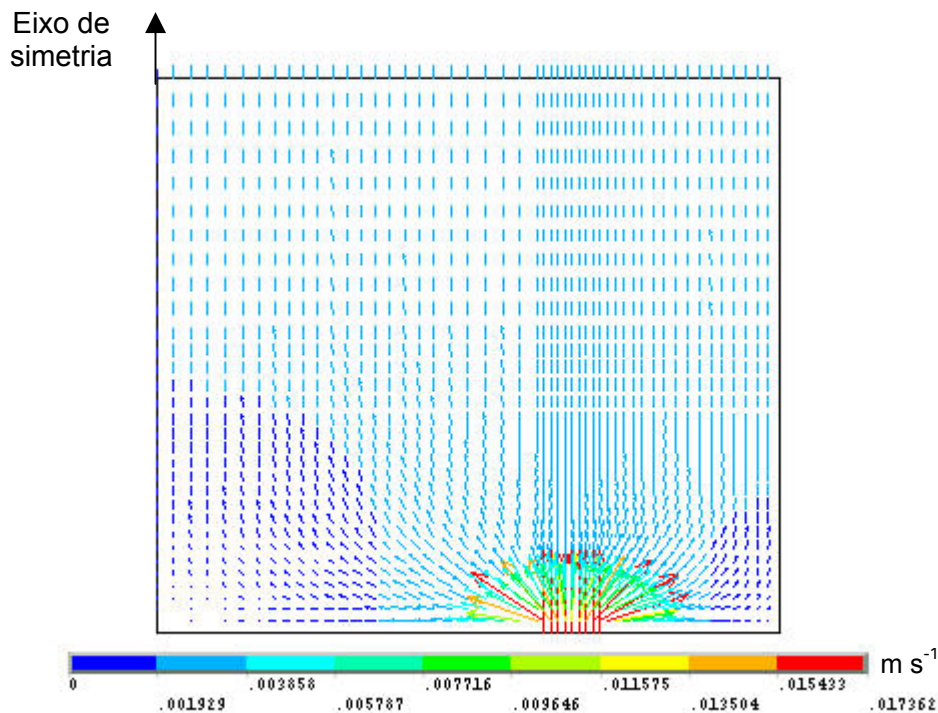


Figura 7 – Vetor de velocidade do ar simulado para o fluxo de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Os valores (médios, máximos e mínimos) das velocidades na superfície da massa de grãos, provenientes dos dois testes experimentais de aeração (cada um com duração de cinco dias), usando um fluxo de ar de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, são apresentados na Figura 8, para cada um dos pontos da superfície dos grãos, conforme esquematizado na Figura 2.

Observa-se, na Figura 8, que na maioria dos pontos, as menores velocidades ocorreram durante o teste 1. Quando se desconsideraram os pontos, os valores médios da velocidade do ar nos testes 1 e 2 foram iguais a $0,0022 \pm 0,0002$ e $0,0023 \pm 0,0002 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente, e a média geral, nos dois testes, foi igual a $(0,0023 \pm 0,0002) \text{ m s}^{-1}$. Quando se considerou a variação da velocidade em cada ponto, durante os cinco dias de teste, nos testes 1 e 2, houve desvios máximos de $0,0004$ e $0,0003 \text{ m s}^{-1}$ e desvios médios de $0,0002$ e $0,0001$, respectivamente. Isso parece indicar que a variação da velocidade do ar na superfície da massa de grãos, durante os dias de aeração, foi maior ou equivalente à variação devido à localização do ponto na superfície.

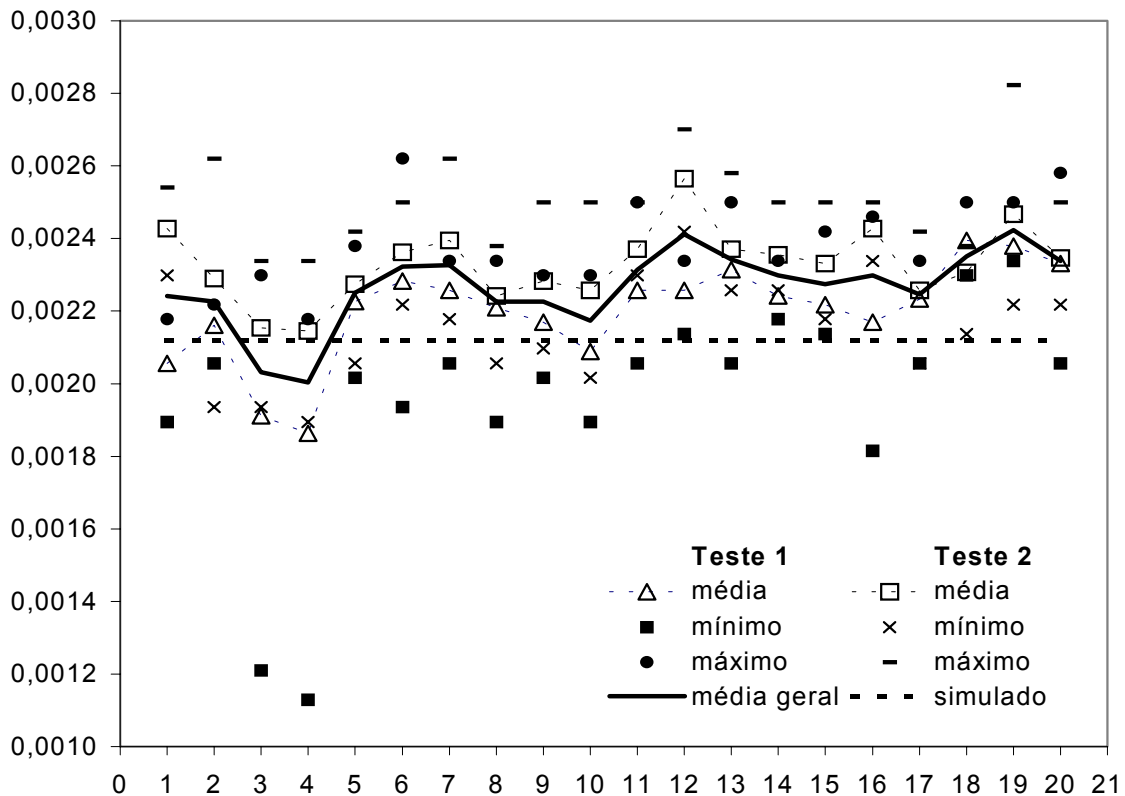


Figura 8 – Resultados simulados e experimentais da velocidade nos dois testes de aeração

Na Figura 8, encontram-se, também, os valores simulados para as velocidades nos pontos da superfície. Observa-se que a distribuição do ar na superfície da massa tendeu a ser uniforme ($0,00212 \text{ m s}^{-1}$). Os erros relativos envolvidos nas simulações das velocidades na superfície dos grãos, referindo-se aos valores médios experimentais como os mais corretos, são apresentados na Tabela 3.

Verifica-se que os maiores erros de simulação ocorreram próximo à parede, devido, provavelmente, à forma ondulada da parede (constituída por chapas corrugadas), que no modelo, foi considerada como reta, ou pela baixa velocidade do ar nesta localização.

Observa-se, também, que os erros envolvidos na predição da distribuição de velocidade, usando a técnica de elementos finitos, foram relativamente baixos e variaram de 2,0 a 11,8%, com um valor médio de 6,9%. Estes erros são

considerados aceitáveis diante das incertezas experimentais. Se a velocidade experimental fosse considerada a mesma em todos os pontos ($0,0023 \text{ m s}^{-1}$), o erro envolvido na simulação seria igual a 7,4%.

Dessa forma, vê-se que a técnica de elementos finitos pode ser utilizada como uma ferramenta importante na determinação da distribuição do ar em silos providos de sistema de aeração dotados de dutos circulares.

Tabela 3 – Erros relativos para cada ponto simulado

Ponto	Erro relativo (%)	Localização	Ponto	Erro relativo (%)	Localização
1	4,7	Parede	11	8,0	Centro
2	4,3	Centro	12	11,4	Parede
3	4,8	Centro	13	8,8	Parede
4	6,3	Centro	14	7,7	Centro
5	5,4	Centro	15	6,0	Parede
6	8,0	Parede	16	7,7	Centro
7	8,1	Parede	17	4,8	Parede
8	4,3	Centro	18	9,8	Centro
9	4,3	Centro	19	11,8	Parede
10	2,0	Centro	20	9,3	Centro

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, conclui-se que:

1 – a utilização da técnica de elementos finitos para a predição da distribuição do fluxo de ar, em silos providos de sistema de aeração, mostrou-se satisfatória. O erro relativo médio envolvido nas simulações foi de 6,9%;

2 – a distribuição de ar, proveniente das simulações, em silos dotados de dutos circulares para aeração indica a existência de zonas de baixa velocidade na massa de grãos, situadas na sua parte inferior, próximas ao centro do silo e na parede; e

3 – a velocidade do ar na superfície da massa de grãos, provenientes da análise de escoamento de ar, tendeu a ser uniforme. Tendência similar aconteceu com as velocidades obtidas experimentalmente.

LITERATURA CITADA

- ALAGUSUNDARAM, K.; JAYAS, D.S. Airflow resistance of grains and oilseeds. **Postharvest News and Information**, Amsterdam, v. 1, n. 4, p. 279-283, 1990.
- ALAGUSUNDARAM, K.; JAYAS, D.S.; FRIESEN, O.H.; WHITE, N.D.G. Airflow patterns through wheat, barley, and canola in bins with partially perforated floors – an experimental investigation. **Applied Engineering in Agricultural**, St. Joseph, v. 10, n. 6, p. 791-796, 1994.
- ANDRADE, E.T., COUTO, S.M., QUEIROZ, D.M. Distribuição de pressão estática em uma coluna de canola: Análise por elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 288 - 295, 2001.
- ANSYS. **Ansys/Multiphysics Product (Program and Program Documentation)**, Release 5.7, ANSYS Inc, Houston. 2001.
- ASAE. American Society of Agricultural Engineers. **Agricultural Engineers Yearbook**. St. Joseph: Michigan, 2000. 796p.
- FERGUSON, W.J. A control volume finite element numerical simulation of the high temperature drying of spruce. **Drying Technology**, New York, v. 3, n. 3, p. 607-634, 1995.
- GINER, S.A.; DENISIENIA, E. Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, n. 63, p. 73-86, 1996.
- GONG, Z.X.; MUJUMDAR, A.S. A two-dimensional finite element model for kiln-drying of refractory concrete. **Drying Technology**, New York, v. 3, n. 3, p. 585-605, 1995.
- HAQUE, E.; AHMED, Y.N.; DEYOE, C.W. Static pressure drop in a fixed bed of grain as affected by grain moisture content. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, n. 4, p. 1095-1098, 1982.
- HUKILL, W.V.; IVES, N.C. Radial air flow resistance of grains. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 36, n. 5, p. 332-335, 1955.
- JAYAS, D.S.; SOKHANSANJ, S.; MOYSEY, E.B.; BARBER, E.M. The effect of airflow direction on the resistance of canola (Rapeseed) to airflow. **Canadian Agricultural Engineering**, Saskatoon, v. 29, n. 2, p.189-192, 1987.
- JAYAS, D.S.; MUIR, W.E. Airflow-pressure drop data for modeling fluid flow in anisotropic bulks. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 34, n. 1, p. 251 - 254, 1991.

- KAY, R.L.; BERN, C.J.; HURBURGH Jr., C.R. Horizontal and vertical airflow resistance of shelled corn at various bulk densities. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, n. 2, p. 733-736, 1989.
- KUMAR, A.; MUIR, W.E. Airflow Resistance of wheat and barley affect by airflow direction, filling method and dockage. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 29, n. 5, p. 1423-1426, 1986.
- LAI, F.S. Three-dimensional flow of air through nonuniform grain beds. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 23, n. 2, p. 729-734, 1980.
- MARCHANT, J.A. The prediction of airflows in crop drying systems by the finite element method. **Journal Agricultural Engineering**, [S.I.], v. 21, p. 417-429, 1976.
- MIKETINAC, M.J.; SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D.S. Graphical analysis of airflow distribution in grain bins using the finite element method. **Canadian Agricultural Engineering**, Saskatoon, v. 28, n. 1, p. 23-30, 1986.
- ROJANO, A.; RAMIREZ, A.; FITZ, E.; OJEDA, W. **Temperature distribution in a greenhouse due to shape factor**, St. Joseph: ASAE, 1998. 10 p. (Paper n.98-4156).
- SAUER, D.B. **Storage of cereal grains and their products**. Minnesota, USA: American Association of cereal chemists, 1992. 614 p.
- SEGERLIND, L.J. **Applied finite element analysis**. New York: John Wiley, 1984. 427p.
- SHEDD, C.K. Some new data on resistance of grains to air flow. **Journal Agricultural Engineering**, [S.I.], v. 32, n. 9, p. 493-495,520, 1951.
- SINICIO, R.; JAYAS, D.S.; MUIR, W.E.; SANDERSON, D.B. Finite-element prediction of non-uniform airflow in fixed beds of wheat. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 2, p. 51-59, 1992.
- SMITH, E.A. 3-Dimensional analysis of air velocity and pressure in beds of grain and hay. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 27, p. 101-117, 1982.
- SOKHANSANJ, S.; FALACINSKI, A.A.; SOSULSKI, F.W.; JAYAS, D.S.; TANG, J. Resistance of bulk lentils to airflow. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 4, p. 1281-1285, 1990.
- YANG, X.; WILLIAMS, D.L. Airflow resistance of grain sorghum as affected by bulk density. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 6, p. 1966-1970, 1990.

CAPÍTULO 3

VARIAÇÃO DE TEMPERATURA E UMIDADE DE GRÃOS ARMAZENADOS EM SILOS COM AERAÇÃO

RESUMO

Neste trabalho, estudou-se a variação de temperatura e de umidade em uma massa de grãos de milho armazenada em um silo, durante a aeração do produto, determinando-se o tempo de aeração requerido para se obter uma diferença de temperatura de 3 °C entre a massa de grãos e o ambiente externo do silo. Os grãos de milho armazenados foram, inicialmente, aquecidos utilizando-se equipamentos para aquecimento e umidificação do ar insuflado na massa. O processo de aeração foi realizado com fluxo de ar de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Com o auxílio de um sistema de aquisição de dados e termopares, foram registradas as temperaturas em diversos pontos da massa de grãos, localizados por meio de distâncias radiais e verticais e pelas direções norte, sul, leste e oeste. Amostras do produto foram retiradas periodicamente, durante o resfriamento, para determinação do teor de umidade. A redução de temperatura na massa de grãos dependeu da localização do produto no interior do silo. As maiores reduções de temperatura foram detectadas no produto localizado nas regiões sul e leste, e as menores, nas regiões norte e oeste, que inicialmente continham o produto em temperaturas mais baixas. A maior redução na temperatura da massa de grãos ocorreu entre 24 e 48 horas de aeração. Um tempo de aeração de, aproximadamente, 70 h foi necessário para que a diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ambiente externo ao silo fosse igual a 3 °C.

Palavras-chave: armazenamento, milho, temperatura, teor de umidade.

VARIATIONS OF TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT OF STORED GRAINS IN BINS WITH AERATION

ABSTRACT

The temperature and moisture content variations in corn kernels stored in a bin during an aeration process are presented in this work. The aeration time requirements were determined to obtain a temperature difference of 3 °C between the mass of grains and the bin external environment. The temperature of the stored grains was increased by submitting the product to a forced flow of moist and pre-heated air before the aeration. Airflow of $0.0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ was used in the aeration process. Temperatures were registered in several points of the mass with the aid of thermocouples connected to a system of data acquisition. The points were located through radial and vertical distances and for the directions North, South, East and West. Samples of the product were removed, periodically, during the process for moisture content determination. The temperature reduction in the mass of grains depended on the location of the product inside the bin. The largest temperature reductions were detected for the product located at South and East, and the smallest ones, for the product at North and West (initially with lower temperature). The largest reduction in the temperature of the mass happened between 24 and 48 hours of aeration. A time of aeration of, approximately, 70 h was necessary to obtaining a 3 °C temperature difference between the mass of grains and the bin external environment.

Keywords: storage, corn, temperature, moisture content.

INTRODUÇÃO

A manutenção da qualidade de grãos agrícolas armazenados por longos períodos depende do controle de insetos, fungos e bactérias que se reproduzem e se desenvolvem no meio (SUN e WOODS, 1997). Uma redução da temperatura da massa de grãos, abaixo de 15 °C, tem sido eficiente na redução da atividade de água dos grãos e, assim, na prevenção do desenvolvimento de insetos e no controle de fungos (SUN e WOODS, 1994; SUN e BYRNC, 1998).

O teor de umidade de um produto exerce uma grande influência na variação de temperatura de uma massa de grãos durante a armazenagem (ABBOUDA et al., 1992; KHANKARI et al., 1994). Por isso, recomenda-se a secagem e limpeza do produto antes do seu armazenamento, pois esses procedimentos diminuem a ação da microflora na massa de grãos, retardando a velocidade das trocas gasosas e o processo de deterioração natural.

Variações de temperatura, devido a mudanças climáticas, também, contribuem para a formação de gradientes de temperatura em uma massa de grãos armazenada. Temperaturas diferentes nos ambientes interno e externo de um silo provocam correntes de ar na massa de grãos, que podem induzir a migração de umidade das áreas de altas temperaturas para as de baixas temperaturas. A migração de umidade pode potencializar o desenvolvimento de insetos, fungos e bactérias e iniciar a deterioração do produto (CONVERSE et al., 1973; BROOKER et al., 1992; CHANG et al., 1993; CASADA e YOUNG, 1994; 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 queda na qualidade final do produto armazenado.

A técnica mais empregada para diminuir gradientes de temperatura na massa de grãos e, conseqüentemente, minimizar a migração de umidade é a aeração (SAUER, 1992; JAYAS, 1995). Este processo, além de inibir o

desenvolvimento de insetos e da microflora, preserva a qualidade do produto e pode até remover odores (NAVARRO e CALDERON, 1982; SILVA et al., 2000).

CALDERWOOD et al. (1984) estudaram o efeito da aeração em arroz armazenado, ao longo de 54 meses, em silos metálicos. Concluíram que o controle de insetos foi o principal fator para o sucesso do armazenamento. Neste sentido, a aeração da massa de grãos mostrou-se eficiente para reduzir a temperatura do produto abaixo da temperatura ótima para o desenvolvimento de insetos e proporcionar, ao final do armazenamento, um produto com uma boa germinação e uma baixa acidez.

ARTHUR (1994) estudou grãos de milho armazenados em silos com aeração contínua. Populações de insetos (*Sitophilus zeamais* e *Tribolium castaneum*) foram reduzidas em silos que continham sistema de aeração.

ARTHUR e THRONE (1994) avaliaram a degradação de inseticida metílico em grãos de milho armazenados em silos aerados e não-aerados. Concluíram que o inseticida se degrada mais rapidamente em silos não-aerados e, também, que a população de insetos nos grãos foi maior nesses silos.

Uma das vantagens do controle de insetos pela manipulação da temperatura na massa de grãos é o menor uso de fumigantes (REED et al., 2000). CUPERUS et al. (1986) relataram que grãos de trigo armazenados sem aeração foram tratados com fumigantes duas vezes mais que aqueles aerados.

Portanto, o conhecimento da variação de temperatura e de umidade em diferentes locais de uma massa de grãos, ao longo de um processo de aeração, pode ser uma ferramenta importante no desenvolvimento e na avaliação de estratégias de controle da aeração para manter os grãos sadios e reduzir os custos com tratamento químico direcionado para insetos e fungos. Este conhecimento pode, também, ser usado em simulações matemáticas para validar modelos de transferência de calor e de massa em grãos armazenados. Uma vez validado, através de simulação (processo rápido, eficiente e de baixo custo), pode-se obter a resposta do sistema ao ser submetido a diferentes condições (JIA et al., 2001).

Este trabalho teve por objetivos (a) estudar as variações de temperatura e de umidade em uma massa de grãos de milho, armazenada em um silo, durante a aeração do produto, e (b) determinar o tempo de aeração requerido para se obter uma diferença de temperatura de 3 °C entre a massa de grãos e o ambiente externo do silo.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado na área de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, durante o período de 1 a 12 de julho de 2001. A área está situada a 20°45'45" latitude sul, 42°52'04" longitude oeste e altitude de 690 m.

Nos experimentos, foram usados grãos de milho (*Zea mays* L.) adquiridos pelo Centro de Produção da Universidade Federal de Viçosa (safra 2000/2001), com teor de umidade inicial de 21% b.u. O produto foi submetido a um processo de secagem com ar ambiente forçado, até atingir um teor de umidade de 13% b.u. O lote continha grãos de diferentes variedades. Alguns parâmetros relacionados com a caracterização do produto (dimensões, massas específicas, aparente e real, e porosidade) foram, então, determinados.

No experimento, foi utilizado um silo metálico cilíndrico (3,6 m de diâmetro e 2,2 m de altura) de fundo totalmente perfurado, ao qual foi adaptado um sistema de aeração (duto circular, ventilador centrífugo com motor trifásico de 1,5 kW e diafragma para controle da entrada do ar no ventilador). O duto foi construído com o recobrimento do fundo do silo com chapas metálicas, fazendo-se com que a área de entrada do ar para o interior do silo apresentasse um formato de anel circular com largura de 0,2 m, que foi posicionado a 1,1 m do centro do silo.

Termopares “tipo T” (AWG 2-24, PVC-PVC) (cobre-constantan) foram posicionados em diferentes locais (um fora do silo, na saída de ar do ventilador, e 9 no interior da massa de grãos), conforme ilustra a Figura 1. Os termopares

foram dispostos nas direções norte-sul e leste-oeste (verdadeiro). No interior do silo, foram posicionados nas interseções das alturas de 0,6 e 1,1 m, com as distâncias radiais de 0; 0,6; 1,2 m (Figura 1).

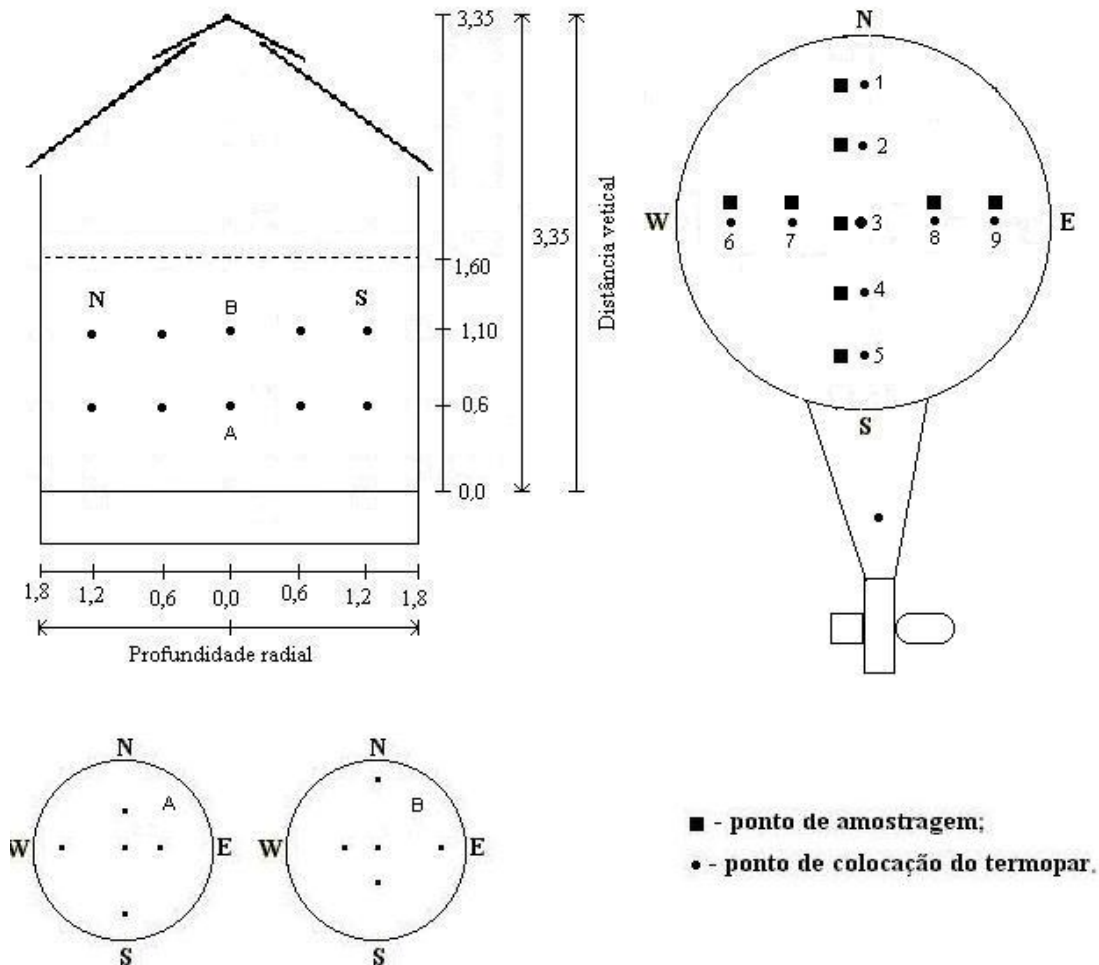


Figura 1 – Vistas lateral e superior da localização dos termopares na massa de grãos e vista superior dos pontos de amostragem.

Os valores das variáveis pertinentes ao experimento foram registrados com auxílio de um sistema automático de aquisição de dados. Uma placa do tipo *plug-in-board* (resolução de 16 bits) e uma placa multiplexada (32 canais) foram usadas para o registro das temperaturas nos 11 pontos. A placa principal também foi utilizada para o registro de valores de parâmetros ambientais (temperatura e umidade relativa). Para a coleta dos dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente foi utilizado um sensor termo-higrômetro digital integrado, com

precisão de 3%. A aquisição de dados foi realizada a cada minuto, e os dados foram armazenados em um microcomputador.

Após a instalação dos sensores no silo, este foi carregado, até a altura de 1,6 m, com milho (13% b.u.). A superfície da massa de grãos foi aplainada e o produto permaneceu armazenado pelo período de 15 dias.

Dois testes usando aeração contínua da massa de grãos foram executados; antes de cada teste, a massa de grãos foi aquecida até, aproximadamente, a temperatura média de 28 °C. Para tal, foram usados equipamentos para aquecimento e umidificação do ar que foi insuflado no silo. O equipamento para aquecimento do ar consistiu de um queimador a gás, controlado por um sistema automatizado, que utilizava a temperatura do ar, na saída do ventilador (mantida em 30 °C), como parâmetro de decisão. Para a umidificação do ar, foi usado um gerador de vapor composto de um depósito de água instalado no interior de uma fornalha (à lenha, de fogo direto) e de tubos metálicos para conduzir o vapor até a entrada de ar do ventilador. A umidade relativa do ar foi monitorada para se obter um teor de umidade de equilíbrio dos grãos de 13% b.u.

Após, aproximadamente, doze horas do aquecimento da massa, executou-se uma amostragem, para determinar a umidade dos grãos, em vários pontos do silo e antes de iniciar o teste com aeração contínua. Para o teste, ajustou-se o diafragma para que o fluxo de ar na saída do plênum fosse de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. O fluxo de ar utilizado equivale a uma vazão de ar de, aproximadamente, $0,02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Cada teste de aeração teve início, aproximadamente, às 12 h, com duração de 96 h, e o intervalo entre os testes foi de 48 h.

Durante os testes, foram realizadas amostragens diárias (amostrador de 2 m de comprimento) para a determinação do teor de umidade. Os pontos de amostragem estavam, aproximadamente, 0,07 m acima dos termopares nos níveis A e B, Figura 1. Na determinação do teor de umidade dos grãos de milho, utilizou-se o método-padrão da estufa, $105 \pm 3 \text{ °C}$ por 24 horas, em três repetições, de acordo com as Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de parâmetros considerados relevantes à caracterização do produto utilizado nos experimentos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos grãos de milho

Propriedades	Valores
Teor de umidade (% b.u.)	13
Dimensões principais	
- Comprimento (mm)	10,5±0,8
- Largura (mm)	8,7 ± 0,6
- Espessura (mm)	4,4 ± 0,5
Massa específica aparente (kg m ⁻³)	733 ± 3
Massa específica real (kg m ⁻³)	1264 ± 6
Porosidade calculada (%)	42

Os valores médios diários da umidade relativa do ar ambiente durante os dois testes de aeração foram de 83,6; 83,9; 82,3; 79,7% e 82,6; 82,2; 82,4; 84,4% para os testes 1 e 2 , respectivamente.

As variações de temperatura e de teor de umidade na massa de grãos, durante o processo de aeração, são apresentadas nas Figuras 2 e 3 para os testes 1 e 2, respectivamente. As Figuras 2 e 3 apresentam essas variações (a) para a direção norte do silo, (b) para a direção sul, (c) para a direção leste e (d) para a direção oeste. As variações são para pontos da massa de grãos localizados nas distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m e nas radiais de 0 (centro do silo), 0,6 e 1,2 m. Os valores diários médios da temperatura ambiente também são apresentados nestas figuras.

Observam-se, nas Figuras 2 e 3, que as temperaturas e umidades do produto situado em diferentes pontos do interior do silo, no início da aeração, diferiram entre si. As variações iniciais dos valores de temperatura e de umidade podem ser visualizadas nas Figuras 4 e 5, respectivamente. Nestas figuras são apresentados, também, valores de temperatura e umidade do produto situado junto à parede do silo (1,8 m de distância radial).

Nos dois testes, observou-se que, na maioria dos casos, as temperaturas para uma distância vertical de 0,6 m foram maiores, ou iguais, àquelas para 1,1 m (Figura 4).

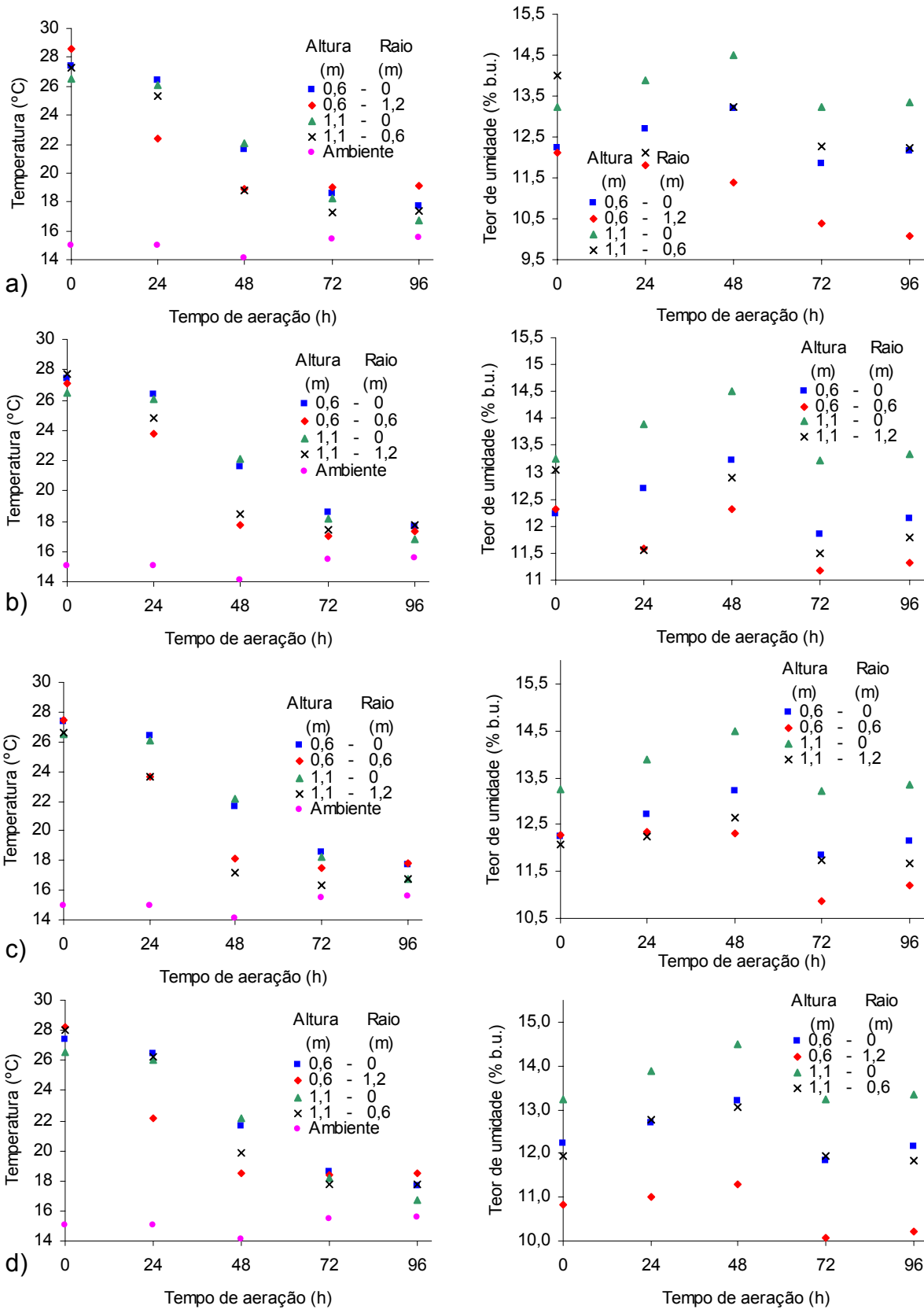


Figura 2 – Variação de temperatura e teor de umidade do milho durante a aeração no Teste 1 para os pontos cardeais: a) Norte, b) Sul, c) Leste e d) Oeste.

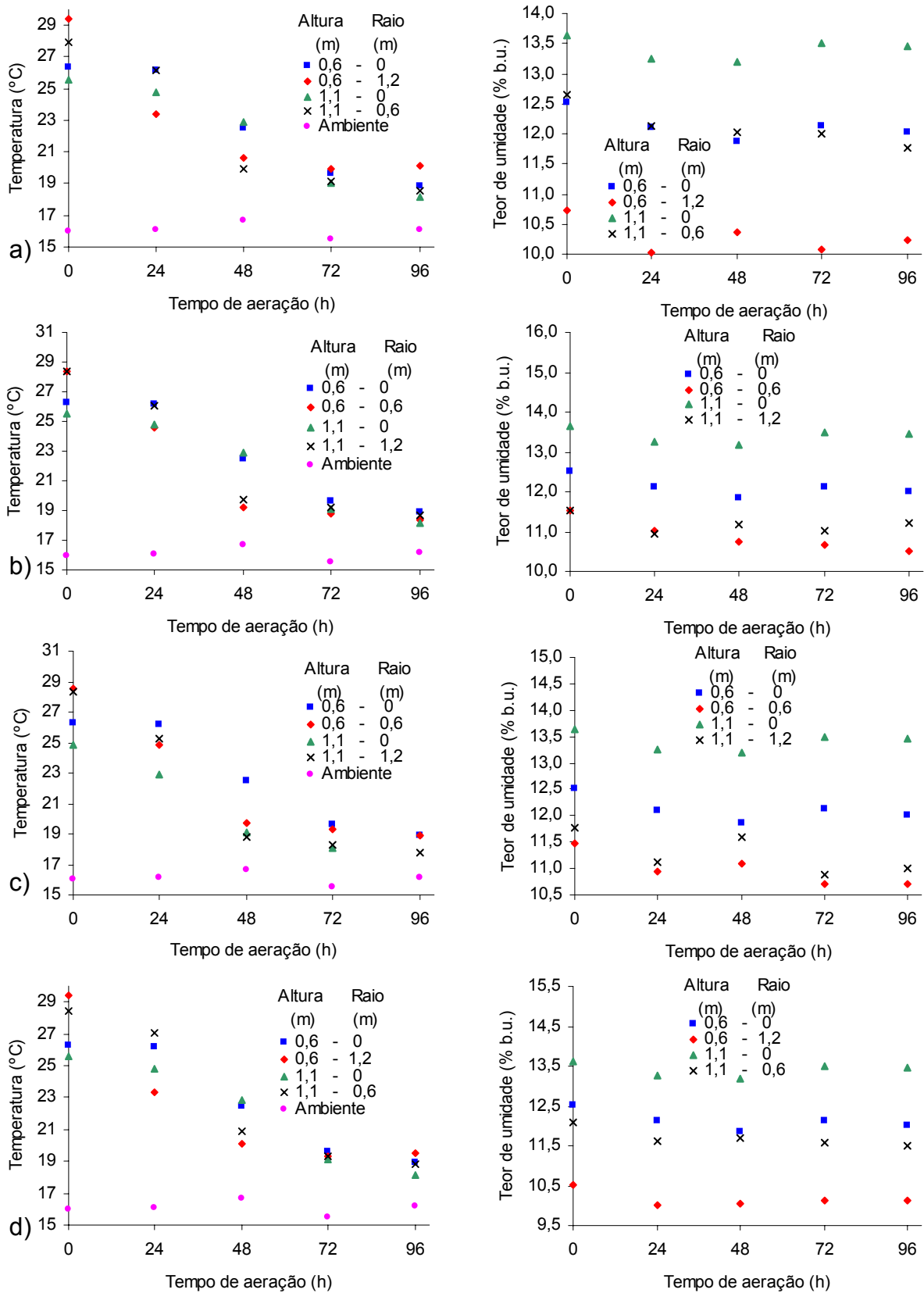


Figura 3 – Variação de temperatura e teor de umidade do milho durante a aeração no Teste 2 para os pontos cardeais: a) Norte, b) Sul, c) Leste e d) Oeste.

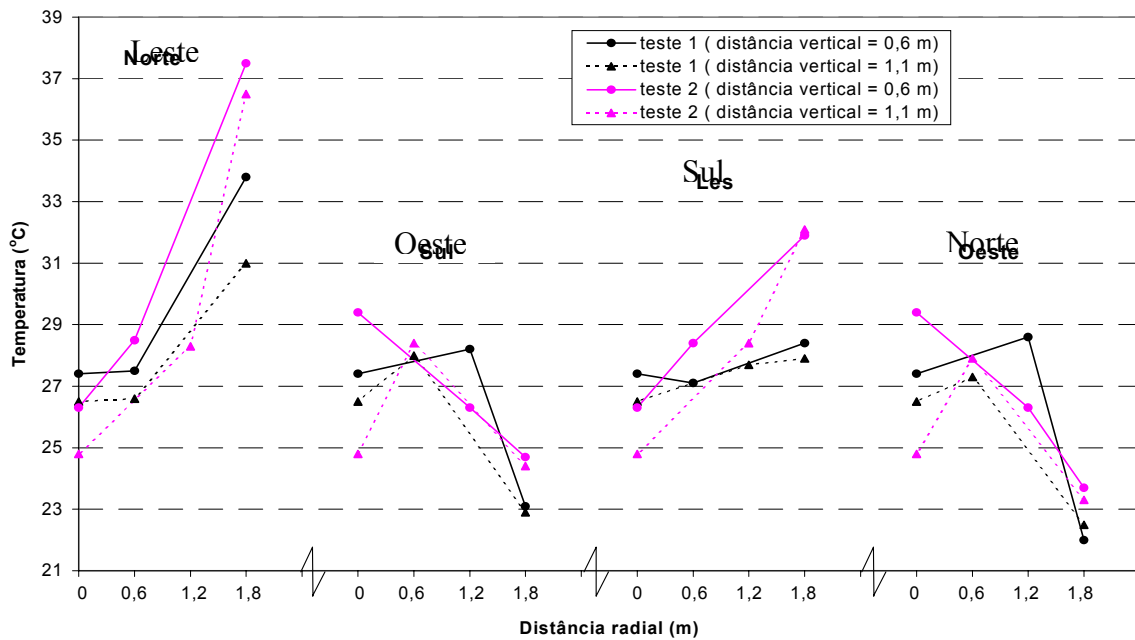


Figura 4 – Temperatura em diferentes pontos da massa de grãos no início da aeração.

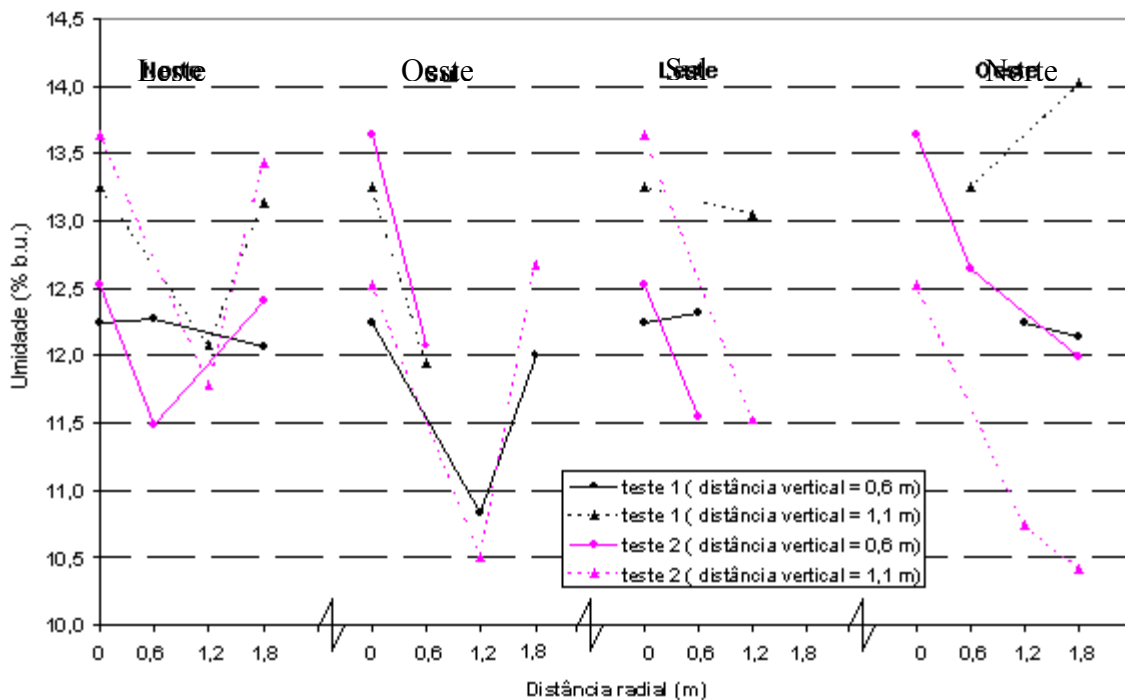


Figura 5 – Umidade em diferentes pontos da massa de grãos no início da aeração.

O comportamento da temperatura inicial (Figura 4), na direção radial, difere de acordo com a localização (norte, sul, leste e oeste) do produto no silo. Nas direções sul e leste, à medida que se aumenta a distância radial, as temperaturas tendem a aumentar, enquanto nas direções norte e oeste tendem a diminuir. Observando os valores de temperatura à distância radial de 1,8 m (próximo à parede do silo), vê-se que, à medida que se afasta do centro do silo, maior é a influência do ambiente externo nos valores de temperatura dos grãos.

Quando se considera a temperatura inicial média em todas as distâncias radiais, a região mais quente foi a do leste e a mais fria foi a do norte, nos dois testes de aeração e nas distâncias verticais de 0,6 e de 1,1 m. Nos dois testes de aeração e em todas as regiões, as maiores temperaturas iniciais foram determinadas no produto situado a uma distância vertical de 0,6 m.

No teste 1 de aeração, o teor de umidade inicial dos grãos (Figura 5) situados a uma distância vertical de 1,1 m, em todas as regiões, foi maior do que aquela dos grãos situados a 0,6 m. Já no teste 2 de aeração, este fato aconteceu apenas com grãos situados nas regiões sul e leste. Quando se considera o teor de umidade inicial médio em todas as distâncias radiais, a região contendo produto com maior teor de umidade foi a sul no teste 1 de aeração, e a leste no teste 2. Para as distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m, os menores o teor de umidade iniciais foram detectados, respectivamente, nas regiões norte e oeste no teste 1, e nas regiões norte e sul, no teste 2.

Portanto, na massa de grãos submetida ao processo de aeração havia gradientes de temperatura e de umidade. Os valores [médio; mínimo; máximo] de temperatura, para toda a massa de grãos, foram iguais a $[27,0 \pm 2,6; 22,0; 33,8]$ °C no teste 1 e $[27,8 \pm 3,7; 23,3; 37,5]$ °C no teste 2. Os valores [médio; mínimo; máximo] de teor de umidade, para toda a massa de grãos, foram iguais a $[12,4 \pm 0,8; 10,6; 14,0]$ % b.u. no teste 1 e $[12,3 \pm 1,0; 10,4; 13,6]$ % b.u. no teste 2.

Durante o teste 1 de aeração, pode-se observar na Figura 2, a maior redução na temperatura, nas quatro direções avaliadas, ocorreu entre 24 e 48 horas depois do início do processo. É interessante notar que a temperatura do ambiente externo, também apresentada nesta figura, durante este período foi

baixa, atingindo, no final de 48 h, 14 °C. Isso, provavelmente, tenha contribuído para um resfriamento mais rápido da massa de grãos. Observa-se, ainda, que, neste período, as reduções de temperatura no eixo central do silo, nas duas distâncias verticais, foram as menores, sendo a redução da temperatura em pontos localizados a uma distância vertical de 1,1 m (mais no interior da massa) sempre a menor. Ao final do teste, a temperatura média da massa de grãos era de 17 °C, ou seja, 2 °C acima da ambiente. A redução na temperatura da massa de grãos, ao final do teste 1 de aeração, nas diferentes regiões e posições (radial e vertical) é apresentada na Figura 6.

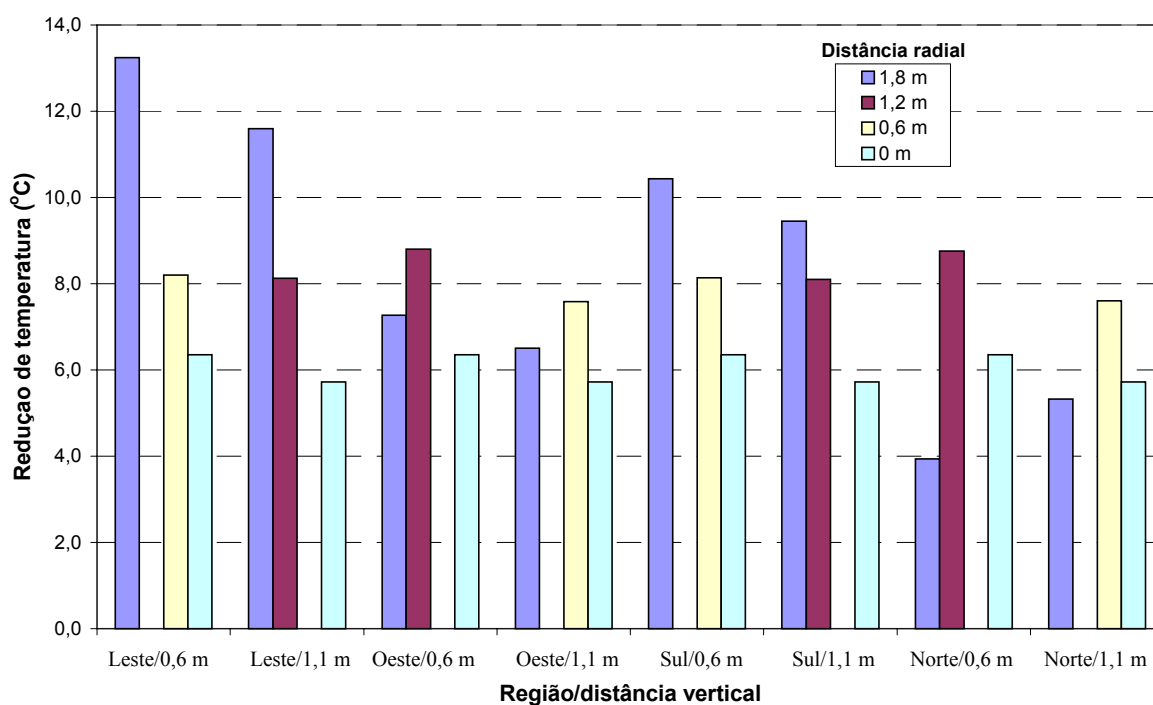


Figura 6 – Redução na temperatura da massa de grãos ao final da aeração – Teste 1.

Durante o teste 2, observa-se na Figura 3, a maior redução na temperatura, nas quatro direções avaliadas, ocorreu entre 24 e 48 horas depois do início do processo. Exceção se faz às reduções de temperatura em pontos situados às distâncias vertical de 1,1 m e radial de 0 m; nesse caso, as maiores reduções ocorreram após 72 h de aeração. É interessante notar que a temperatura do ambiente externo, também apresentada nessa figura, foi maior do que a que

vigorava durante o teste 1. As menores reduções de temperatura ocorreram no eixo central do silo, nas duas distâncias verticais. Ao final do processo de aeração a temperatura média da massa de grãos era de 19 °C, ou seja, 2,9 °C acima da temperatura do ambiente. A redução na temperatura da massa de grãos ao final do teste 2 de aeração, nas diferentes regiões e posições (radial e vertical), é apresentada na Figura 7.

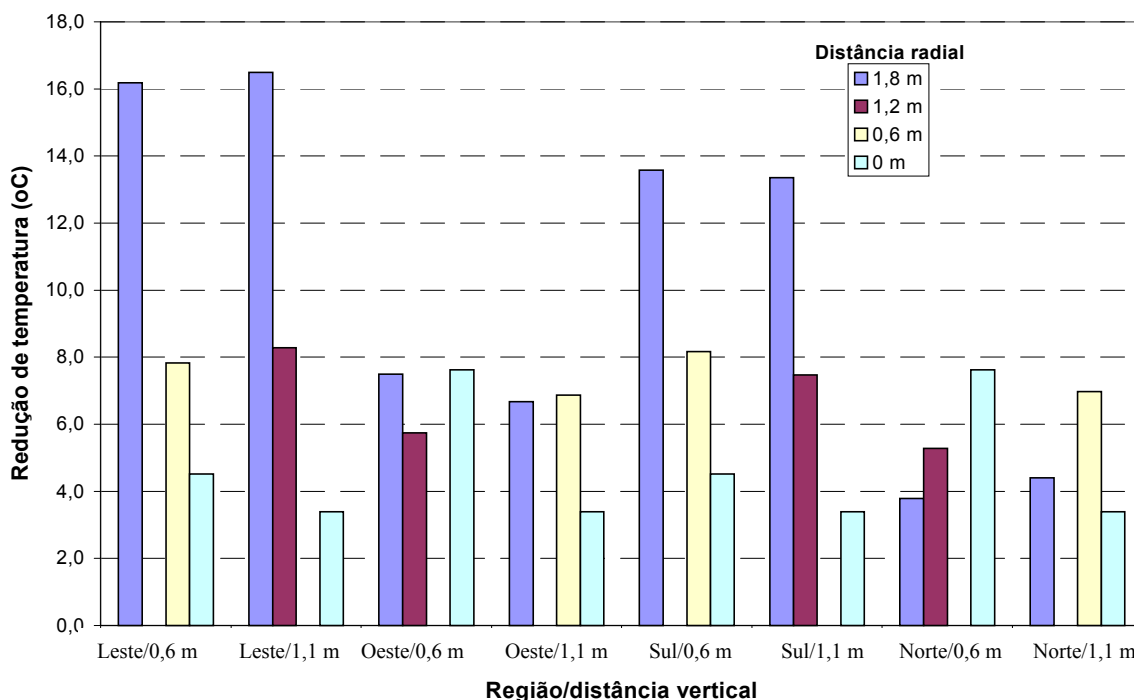


Figura 7 – Redução na temperatura da massa de grãos ao final da aeração – Teste 2.

Nos dois testes, as maiores reduções de temperatura foram detectadas no produto localizado nas regiões sul e leste, e as menores, nas regiões norte e oeste, que inicialmente continham o produto em temperaturas mais baixas.

Quanto ao teor de umidade do produto, verifica-se a ocorrência de gradientes nas distâncias verticais e, também, radiais, desde o início do teste, provavelmente devido à umidificação do ar para o aquecimento do sistema, realizado antes da aeração, e ao posicionamento do sistema de aeração. Na umidificação do ar, as variações radiais na umidade do produto eram esperadas

devido ao posicionamento do sistema de aeração, a uma distância radial de 1,1 m do centro do silo. Assim, quanto maior era a distância radial, até 1,3 m, menor era o teor de umidade final do produto, pois este estaria mais próximo à saída do ar.

Os valores médios da temperatura e do teor de umidade da massa de grãos e, também, da temperatura do ambiente externo ao silo, durante os dois testes de aeração, são mostrados na Figura 8. Valores relativos à diferença entre a temperatura da massa de grãos e a do ambiente externo, também, encontram-se nessa figura. Observa-se que a diferença entre as temperaturas atingiu um valor de 3 °C entre 48 e 72 h de aeração no teste 1 e entre 72 e 96 h no teste 2. A menor temperatura ambiente no decorrer do teste 1 contribuiu para agilizar o resfriamento da massa de grãos.

Aos dados relativos à diferença entre a temperatura da massa de grãos e a do ambiente externo (ΔT), que aconteceram durante os dias de aeração (t), foram ajustadas equações polinomiais de segundo grau (regressão), cujos coeficientes são apresentados na Tabela 2, acompanhados dos respectivos coeficientes de variação (R^2). A representação gráfica destas equações são mostradas na Figura 8. As equações ajustadas foram usadas para estimar o tempo de aeração necessário para que a diferença de temperatura entre os dois ambientes fosse igual a 3 °C. Como resultado, foram obtidos os valores 69,7 e 69,1 h, respectivamente, para os testes 1 e 2 de aeração.

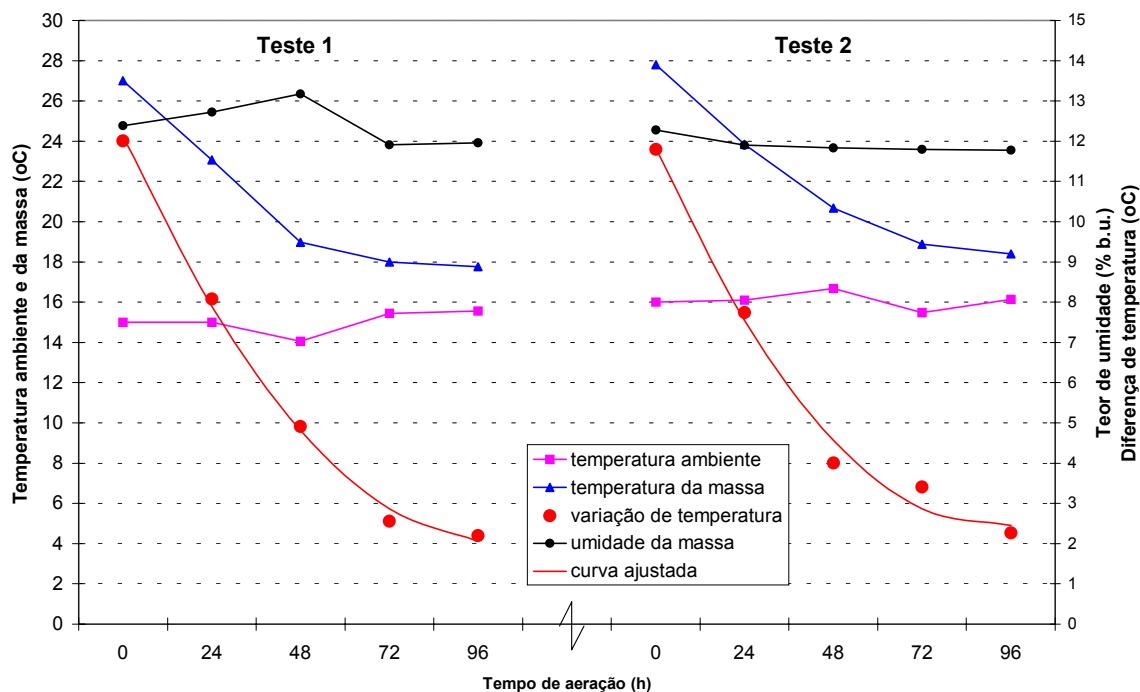


Figura 8 - Valores médios da temperatura e do teor de umidade da massa de grãos, da temperatura do ambiente externo ao silo, e diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ambiente externo durante os dois testes de aeração.

Tabela 2 – Coeficientes das equações ajustadas ($\Delta T = At^2 + Bt + C$) para expressar a diferença entre temperaturas dos grãos e a do ambiente externo (ΔT) em função do tempo (t) de aeração

Teste de aeração	A	B	C	R ²
1	$9,850 \times 10^{-4}$	$-1,993 \times 10^{-1}$	12,11	0,998
2	$1,114 \times 10^{-3}$	$-2,044 \times 10^{-1}$	11,81	0,989

CONCLUSÕES

As análises dos dados e a interpretação dos resultados obtidos nos testes de aeração permitiram concluir que:

1 - À medida que se aumentava a distância radial, as temperaturas dos grãos situados nas direções sul e leste tendiam a aumentar, enquanto as daqueles situados nas direções norte e oeste tendiam a diminuir.

2 - Quando se considerava a temperatura inicial média de todas as distâncias radiais, a região mais quente foi a leste e a mais fria foi a norte, nos dois testes de aeração e nas distâncias verticais de 0,6 e de 1,1 m. Nos dois testes de aeração e em todas as regiões, as maiores temperaturas iniciais foram verificadas no produto situado a uma distância vertical de 0,6 m.

3 - A redução de temperatura na massa de grãos dependeu da localização do produto no interior do silo, definida pelas distâncias radial e vertical e pelas direções norte, sul, leste e oeste.

4 - As reduções de temperatura do produto tornaram-se menores à medida que a sua localização se aproximava do centro do silo.

5 - As maiores reduções de temperatura foram detectadas para o produto localizado nas regiões sul e leste, e as menores, nas regiões norte e oeste, que inicialmente continham o produto em temperaturas mais baixas.

6 - A maior redução na temperatura da massa de grãos ocorreu entre 24 e 48 horas de aeração.

7 - Para a vazão de ar utilizada neste trabalho, um tempo de aeração de, aproximadamente, 70 h foi necessário para que a diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ambiente externo ao silo fosse igual a 3 °C.

LITERATURA CITADA

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, 1992.

ARTHUR, F. H. Feasibility of using aeration to control insect pests of corn stored in southeast Georgia: simulated field test. **Journal Economical Entomology**, Lanham, v. 87, n. 5, p. 1359-1365, 1994.

ARTHUR, F. H.; THRONE, J. E. Pirimiphos-methyl degradation and insect population growth in aerated and unaerated corn stored in southeast Georgia: small bin test. **Journal Economical Entomology**, Lanham, v. 87, n. 3, p. 810-816, 1994.

- 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.
- CALDERWOOD, D. L.; COGBURN, R. R.; WEBB, B. D.; MARCHETTI, M. A. Aeration of rough rice in long-term storage. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 27, n. 5, p. 1579 - 1585, 1984.
- 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, 1994.
- 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.
- 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.
- CUPERUS, G. W.; PRICKETT, C. K.; BLOOME, P. D.; PITTS, J. T. Insect populations in aerated and unaerated stored wheat in Oklahoma. **Journal Kansas Entomology Society**, v. 59, p. 620-627, 1986.
- 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.
- JAYAS, D.S.; WHITE, N. D.G.; MUIR, W.E. **Stored-Grain Ecosystems**. New York:Marcel Dekker, Inc. 1995. 756p.
- JIA, C.; SUN, D. W.; CAO, C. Computer simulation of temperature changes in a wheat storage bin. **Journal of Stored products Research**, [S.I.], v. 37, p. 165-177, 2001.
- 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.
- NAVARRO, S.; CALDERON, M. **Aeration of grain in subtropical climates**. Rome: FAO Agricultural Services Bulletin, n. 52, 1982.

- REED,C.; ARTHUR, F. H. Aeration. In: SUBRAMANYAM, B., HAGSTRUM, D. W. **Alternative to pesticides in stored-product IPM**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 51-72.
- SAUER, D.B. **Storage of cereal grains and their products**. St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, Inc. 1992. 615p.
- SILVA, J. S.; LACERDA FILHO, A. F.; DEVILLA, I. A. Aeração de grãos armazenados. In: SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, MG: Editora Aprenda Fácil, 2000. p. 261 – 277.
- 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.
- SUN, D. W.; WOODS, J. L. Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 37, p. 1919-1926, 1994.
- SUN, D. W.; WOODS, J. L. Deep bed simulation of the cooling of stored grain with ambient air: a test bed for ventilation control strategies. **Journal of Stored products Research**, [S.I.], v. 33, p. 299-312, 1997.
- SUN, D. W.; BYRNE, C. Selection of EMC/ERH isotherm equations for rapeseed. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, n. 69, p. 307-315, 1998.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DA DETERIORAÇÃO E DAS DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURA E TEOR DE UMIDADE DE GRÃOS ARMAZENADOS EM SILOS COM AERAÇÃO

RESUMO

Este trabalho teve por objetivos desenvolver um algoritmo, implementado na linguagem Basic, para simular a temperatura, teor de umidade e deterioração de grãos de milho armazenados em silos metálicos durante o processo de aeração. Considerou-se como sistema uma seção de um silo metálico (diâmetro de 3,6 m) preenchido até altura de 1,6 m com grãos de milho. O sistema foi discretizado em 1550 elementos retangulares, com lados paralelos, e a análise realizada foi bidimensional. O programa é composto de uma seção de entrada de dados e de três rotinas principais: (1) rotina para determinação da vazão de ar que aflui ou eflui de cada face dos elementos, (2) rotina para percorrer a malha de elementos e (3) rotina para simulação da temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos durante o processo de aeração. Dados experimentais foram usados para validar o modelo de distribuição de temperatura e de teor de umidade. O modelo desenvolvido mostrou-se adequado para prever as distribuições de temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos. Os erros médios envolvidos na predição de temperatura e de teor de umidade foram inferiores a 9 e 6%, respectivamente. A deterioração média dos grãos, estimada pelo modelo, foi de $2,8 \times 10^{-4}\%$.

Palavras-chave: armazenamento, deterioração, milho, simulação, temperatura, teor de umidade,

MODELING OF THE DETERIORATION AND DISTRIBUTIONS OF TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT OF STORED GRAINS IN SILOS WITH AERATION

ABSTRACT

This work presents an algorithm, implemented in the Basic language, to predict temperature, moisture content and deterioration in corn kernels stored in a metallic bin during the aeration process. The system was considered as a section of a metallic bin (diameter of 3,6 m) filled out with corn until a height of 1,6 m. The system was divided into 1550 rectangular elements, with parallel sides, and a two-dimension analysis was accomplished. The program is composed of an input data section and three main routines: (1) routine for determination of the inlet and outlet airflow for each element face, (2) routine to travel the mesh of elements and (3) routine for simulation of the temperature, moisture content and deterioration of the grains during the aeration process. Experimental data were used to validate the model of temperature and moisture content distributions. The developed model was shown appropriate to predict the temperature and moisture content distributions of the grains and the deterioration of the grains. The average errors involved in the temperature and moisture content predictions were less than 9 and 6%, respectively. The grain deterioration predicted by the model was $2.8 \cdot 10^{-4}$ %.

Key words: storage, deterioration, corn, simulation, temperature, moisture content

INTRODUÇÃO

Na safra 2001/2002, da área cultivada no Brasil (entre 38,3 e 39,2 milhões de hectares), 95,08% está sendo utilizada por cinco grandes culturas: soja (39,43%), milho (32,24%), feijão (10,78%), arroz (8,53%) e trigo (4,1%), cujas estimativas de produção, em milhões de toneladas, são de 39,8; 38,7; 3,1; 11,1 e 2,9, respectivamente. As lavouras destes produtos encontram-se concentradas nas regiões centro-oeste, sul e sudeste (CONAB, 2001).

A expressiva produção de grãos gera a necessidade de sistemas de armazenagem eficientes que propiciem a conservação das propriedades físicas e organolépticas do produto. Para isto são requeridas técnicas adequadas que reduzam, a níveis aceitáveis, o processo de deterioração que, por ser altamente dependente da temperatura e da umidade dos grãos, está relacionado com a respiração do produto e de microorganismos que o acompanham (SAUER, 1992; THOMPSON, 1972; STEELE et al., 1969).

A técnica mais empregada com vista a prevenir ou solucionar problemas de conservação do produto durante o período de armazenamento é a aeração, cujos, principais objetivos, segundo SILVA et al. (2000), são: resfriar, uniformizar a temperatura, prevenir o aquecimento e o umedecimento e promover remoção de odores na massa de grãos.

A qualidade de grãos (cevada e trigo) armazenados em silos metálicos, com aeração e sem, foram avaliados por HALDERSON (1985) durante três anos em Idaho, E.U.A. O autor concluiu que o processo de aeração é economicamente viável no controle de insetos e na manutenção do teor de umidade dos grãos a um nível seguro. Obtendo no final do processo, um produto sem deterioração causada por fungos e a níveis aceitáveis de germinação. Resultados semelhantes foram observados por LASSERAN et al. (1994) que avaliaram o manejo da aeração de grãos de trigo armazenados em silo metálico retangular, por 300 dias, na França. Durante o processo, a temperatura do ar foi controlada por termostato e o fluxo de ar foi de $7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-3}$ de grão. Segundo os autores, não foi necessário o uso de inseticidas, houve inibição do crescimento de fungos e redução na tarifa de

energia, pois os ventiladores foram utilizados somente à noite. Concluíram que o “design” e o manejo adequado da aeração preservaram a qualidade dos grãos e diminuíram os custos de armazenamento.

Segundo STEELE et al. (1969), a produção do dióxido de carbono, água e calor está associada com a respiração ou deterioração e que o dióxido de carbono pode ser traduzido como perda de matéria seca do grão. Os autores avaliaram a produção de dióxido de carbono no decorrer do armazenamento de milho, variando a temperatura (1,7 a 48,9 °C), teor de umidade (13 a 32% b.u.) e porcentagem de danos mecânicos (0 a 40%). Como resultado, obtiveram uma equação para estimar o tempo permissível de armazenamento antes que 0,5% da matéria seca tenha sido consumida.

GUPTA et al. (1999) investigaram as relações entre a perda de matéria seca e a qualidade de grãos de milho usando como indicador o total de grãos danificados (máximo de 5%). Utilizaram dois teores de umidade (18 e 22% b.u.) e três níveis de danos (0, 15 e 30%) e temperatura constante de 20 °C. Verificaram que o milho que alcançou uma perda de matéria seca de 0,5%, para altos teores de umidade e danos mecânicos, não era de boa qualidade. Relatam, ainda, que os critérios utilizados nas simulações de secagem e armazenamento de milho devem variar em função do teor de umidade e de danos mecânicos do produto.

O conhecimento da distribuição de temperatura e umidade nos grãos armazenados não só ajuda a identificação da atual deterioração do produto, mas, também, indica o potencial de deterioração do mesmo (ABE e BASUNIA, 1996).

Modelos matemáticos unidimensionais para a simulação do processo do armazenamento de grãos em silos com aeração é um assunto que vem sendo investigado por muitos pesquisadores ao longo dos anos (THOMPSON, 1972; MISENER e SHOVE, 1976; BROOKER e DUGGAL, 1982; SUTHERLAND et al., 1983; QUEIROZ et al., 1987; KANUJOSO et al., 1995; CASADA e ALGHANNAM, 1999). As simulações permitem predizer o tempo máximo de armazenamento, o fluxo de ar mínimo a ser usado no processo para que não ocorra perda do produto em uma dada região e o efeito das condições ambientais no produto armazenado.

THOMPSON (1972) simulou o armazenamento temporário de milho com alto teor de umidade utilizando a aeração contínua. O modelo é limitado para condições de baixas temperaturas e de baixos fluxos de ar. O autor simulou uma série de condições de armazenamento e avaliou os efeitos do fluxo de ar, umidade e temperatura inicial dos grãos e condições ambientais na perda de matéria seca do produto. Os resultados obtidos mostraram uma menor deterioração dos grãos e, conseqüentemente, um tempo de armazenamento seguro mais longo quando, em grãos a um baixo teor de umidade, se usa um maior fluxo de ar. Além disso, a temperatura inicial dos grãos não afetou a deterioração.

BROOKER e DUGGAL (1982) utilizaram o modelo de perda de matéria seca, desenvolvido por STEELE et al. (1969), para estimar o período de armazenamento seguro para grãos de milho armazenados com diferentes teores de umidade e temperaturas. Investigaram, também, o efeito da convecção natural do ar e o da aeração forçada ($0,11 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$). Como critério para término das simulações foi estabelecido que deveria ser atingido 0,5% de perda da matéria seca. Após várias simulações, concluíram que, para baixas taxas de aeração, o tempo de armazenamento seguro é maior do que quando se têm as convecções naturais.

QUEIROZ et al. (1987) implementaram um programa de computador, com base no modelo desenvolvido por MOREY et al. (1976), para simular a secagem de milho em baixas temperaturas. Os autores incluíram no programa o modelo de deterioração de STEELE et al. (1969), que prevê a perda de matéria seca do milho de acordo com a temperatura e umidade dos grãos e com o tempo de permanência do produto nessas condições. As simulações foram encerradas quando a perda de matéria seca atingisse 0,4%. Após a validação do modelo, concluíram que aumentos no teor de umidade do milho provocaram elevação no fluxo de ar mínimo para secagem do produto com ar natural e que o modelo de Morey pode ser utilizado na simulação de secagem em baixas temperaturas.

Equações diferenciais que governam problemas, bi e tridimensionais, de transferência de calor no ecossistema dos grãos armazenados têm sido resolvidas usando métodos analíticos ou, na maioria das vezes, numéricos. Dentre os

métodos numéricos, as técnicas de diferenças finitas e de elementos finitos têm sido usadas por vários pesquisadores na solução de problemas (JIA et al., 2001; ANDRADE e MOLIN, 1999; THORPE, 1997; ABE e BASUNIA, 1996; FRANCA et al., 1995; CHANG et al., 1994; OBALDO et al., 1991; ALAGUSUNDARAM e JAYAS, 1990; HAGHIGHI et al., 1990; METZGER e MUIR, 1983 e YACIUK et al., 1975).

O método dos elementos finitos assume que qualquer distribuição contínua em um domínio pode ser aproximada por um modelo discreto composto de um conjunto de funções contínuas definidas em um número finito de subdomínios ou elementos (IRUDAYARAJ et al., 1992; SEGERLIND, 1984). Os elementos são conectados em pontos ao longo do contorno, por meio de nós, e as equações que regem o processo são obtidas pela minimização de uma funcional que corresponde ao problema físico ou por métodos de resíduos ponderados. A técnica proporciona a flexibilidade e a versatilidade necessárias para análises de problemas em que o comportamento do material, configuração e condições de contorno e de carregamento são complexos.

Segundo FERGUSON (1995), o método de elementos finitos tem sido utilizado para resolver uma grande variedade de problemas. MARCHANT (1976) utilizou o método para descrever o fluxo de ar em grãos agrícolas e CHAPMAN et al. (1989) para determinar a distribuição bidimensional do fluxo de ar em graneleiros. LOMAURO e BAKSHI (1995) analisaram, pela técnica de elementos finitos, o teor de umidade de alimentos armazenados (frutas, cereais, carne e outros), enquanto, MUTHUKUMARAPPAN e GUNASEKARAN (1996) desenvolveram um modelo bidimensional para simular a difusão de umidade durante a secagem de grãos de milho. ANDRADE et al. (1998) determinaram a distribuição de temperatura em uma massa de grãos de trigo armazenada em silo cilíndrico de concreto exposto a diferentes condições climáticas e MONTROSS e MAIER (2000) desenvolveram um modelo para prever a transferência de calor e massa em silos metálicos com e sem aeração, para tal, ambos usaram o método dos elementos finitos.

Apesar do grande número de modelos desenvolvidos para descrever o processo e os efeitos da aeração em grãos armazenados em silos, nota-se a existência de lacunas, tais como: (a) os modelos unidimensionais, apesar de apresentarem resultados completos em distribuições de temperatura, umidade e deterioração na massa de grãos, não consideram a variação direcional da resistência do produto à passagem de ar, o que é verdadeiro para diversos tipos de grãos agrícolas e (b) os modelos bidimensionais existentes não permitem a análise da deterioração do produto.

Em vista do exposto, este trabalho teve por objetivos: (1) desenvolver um modelo bidimensional para determinação da distribuição de temperatura e de umidade de grãos de milho armazenados em um silo metálico cilíndrico durante o processo de aeração; (2) Implementar um modelo para determinação da deterioração da massa de grãos utilizando os resultados a serem obtidos pelo modelo de distribuição de temperatura e umidade e (3) validar os modelos com resultados experimentais de distribuição de temperatura e umidade em um silo com aeração.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado na área de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas (Departamento de Engenharia Agrícola), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

Desenvolveu-se um software para determinar a distribuição de temperatura e teor de umidade de grãos de milho durante o armazenamento em um silo provido de um sistema de aeração. O sistema considerado (seção longitudinal da massa de grãos armazenados) com as respectivas dimensões é mostrado na Figura 1. O sistema foi dividido em 1550 elementos retangulares, com lados paralelos, e a análise realizada foi bidimensional.

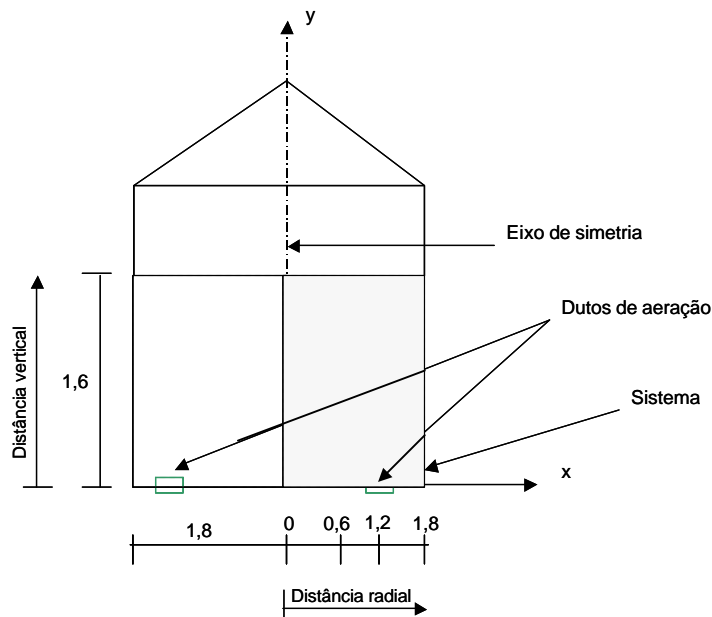


Figura 1 – Esquema do sistema modelado.

O programa é composto de uma seção de entrada de dados e de três rotinas principais: (1) rotina para determinação da vazão de ar que aflui ou eflui de cada face dos elementos: “VAZÃO”; (2) rotina para percorrer a malha de elementos: “PERCORRE”; (3) rotina para simulação da temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos durante o processo de aeração: “SIMULA”. Um algoritmo do programa é apresentado na Figura 2.

Entrada de dados

Cálculo da vazão de ar em cada elemento

Para cada hora

Para cada elemento (x) na ordem de precedência

Simula (x)

Próximo elemento

Próxima hora

Imprime resultados

Figura 2 – Algoritmo do programa desenvolvido.

- **Dados de entrada**

Os dados de entrada requeridos pelo programa foram: a massa específica do produto, a temperatura e a umidade relativa do ar insuflado durante o processo de aeração, a temperatura e o teor de umidade inicial do produto (obtidos no Capítulo 3), o incremento de tempo, tempo total de simulação (DS) e a distribuição do fluxo de ar (gerada utilizando-se a técnica de elementos finitos, Capítulo 2).

- **Temperatura e umidade relativa do ar insuflado**

Os valores de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, utilizados nos quatro dias de simulação, foram iguais aos percebidos pelo sistema analisado no Capítulo 3. Os valores de temperatura introduzidos no programa consideram um aquecimento do ar ambiente de 2 °C, proveniente do ventilador, durante o processo de aeração.

- **Temperatura e umidade inicial do produto**

Os valores iniciais de temperatura e de teor de umidade dos grãos, introduzidos no programa, foram obtidos a partir daqueles determinados experimentalmente, no início do processo de aeração, Capítulo 3, onde o sistema foi considerado em três dimensões. Devido aos gradientes de temperatura e umidade existentes nas diferentes regiões do silo, detectados nos experimentos, nas simulações foram usados, para cada ponto do sistema, valores médios das temperaturas e umidades referentes às direções Norte, Sul, Leste e Oeste. O sistema foi, também, submetido à análises considerando-se, isoladamente, temperaturas e teores de umidade relativos a cada uma destas regiões. Nestes casos, nos pontos onde não haviam dados de temperatura e de teor de umidade, foram utilizados valores médios.

Aos dados, relativos ao teor de umidade dos grãos (U), foram ajustadas equações de primeiro grau (regressão múltipla) em função da distância vertical (h) e da distância radial (r). As equações foram ajustadas para faixas de distâncias vertical e radial de 0,1 a 1,6 m e de 0 a 1,2 m, respectivamente. Para distâncias

radiais superiores a 1,2 m, o teor de umidade foi considerado constante e igual ao desta distância.

Método similar não se adequou à distribuição experimental de temperatura em função das distâncias vertical e radial. Desta forma, dividiu-se o silo em regiões e, nas simulações, as temperaturas por região foram introduzidas no programa (Figura 3). Na Tabela 1 são apresentadas a localização de cada termopar, cuja as temperaturas foram utilizadas na inicialização em cada região.

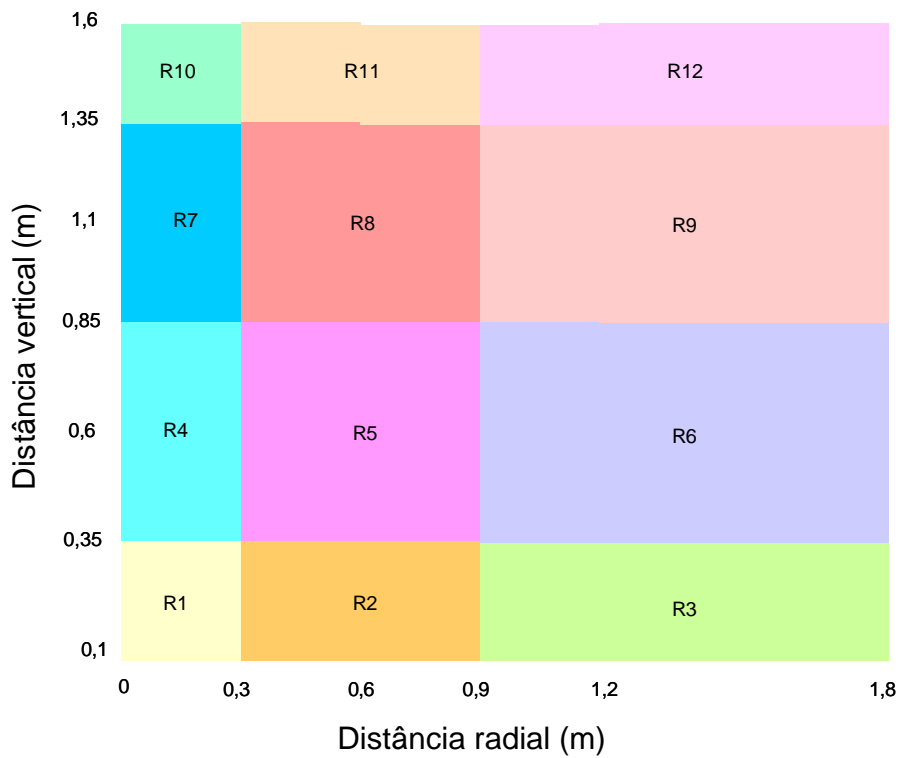


Figura 3 – Esquema da divisão do sistema em regiões.

Tabela 1 – Localização dos termopares utilizados para inicializar a temperatura em cada região

Região	Distância Vertical	Distância radial
1	0	0
2	0	0,6
3	0	1,2
4	0,6	0
5	0,6	0,6
6	0,6	1,2
7	1,1	0
8	1,1	0,6
9	1,1	1,2
10	1,6	0
11	1,6	0,6
12	1,6	1,2

- **Rotina “VAZÃO”**

“VAZÃO” é uma rotina para determinação das vazões de ar que afluem e efluem através de cada face dos elementos. As velocidades nodais, determinadas no modelo de distribuição de ar (Capítulo 2), foram utilizadas para o cálculo das vazões de ar através de cada face dos elementos que compunham o sistema investigado neste trabalho.

As equações para cálculo da vazão de ar em cada face dos elementos foram determinadas aplicando-se as leis de conservação de massa, considerando o escoamento do ar em regime permanente. A velocidade do ar em cada face do elemento foi considerada como sendo a média das velocidades nos nós que delimitam a face. Os elementos foram considerados de espessura unitária.

- **Rotina “PERCORRE”**

“PERCORRE” é uma rotina para percorrer a malha de elementos, na qual a ordem de precedência dos elementos foi determinada buscando-se simular o efeito da propagação do ar no sistema. Como pré-requisitos para que o elemento seja percorrido é necessário que sejam conhecidas as temperaturas e as razões de mistura do ar que afluem pelas faces de cada elemento. Desta forma, foi utilizado um algoritmo de busca em largura, que simula o efeito de uma onda, como a

propagação do ar, e garante que os pré-requisitos foram satisfeitos. Para auxiliar o algoritmo de busca em largura, utilizou-se, também, uma estrutura de dados de uma fila, conforme descrito em AHO et al. (1983). Na Figura 4 é apresentado um esquema do funcionamento da rotina, considerando alguns elementos do sistema analisado. Um exemplo da fila de elementos é mostrado na Figura 5. Primeiramente, é criada uma fila e, logo após, o elemento 1 é colocado na fila, simulado e retirado da mesma. Depois deste ter sido simulado, os seus vizinhos (2, 3 e 4) são inseridos na fila. Então, o elemento 2, o próximo na fila, é retirado da fila, simulado e seus vizinhos adicionados à fila. E assim sucessivamente, até que a fila esteja vazia, ou seja, não haja mais elementos na fila. O algoritmo de busca em largura permite que os elementos sejam calculados de forma que o percurso na malha possua a forma de ondas.

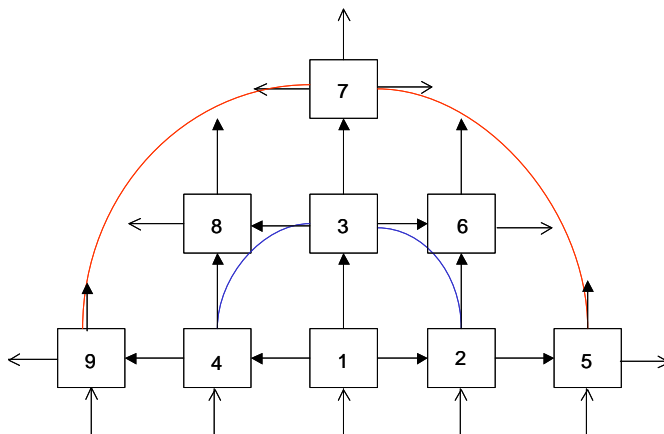


Figura 4 – Esquema do algoritmo de busca em largura.

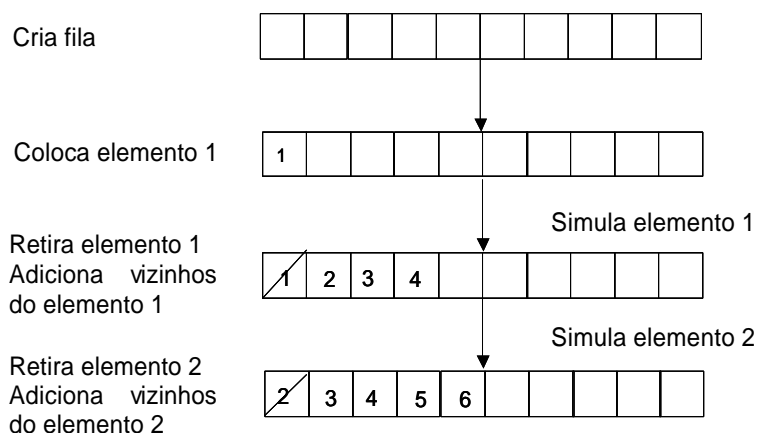
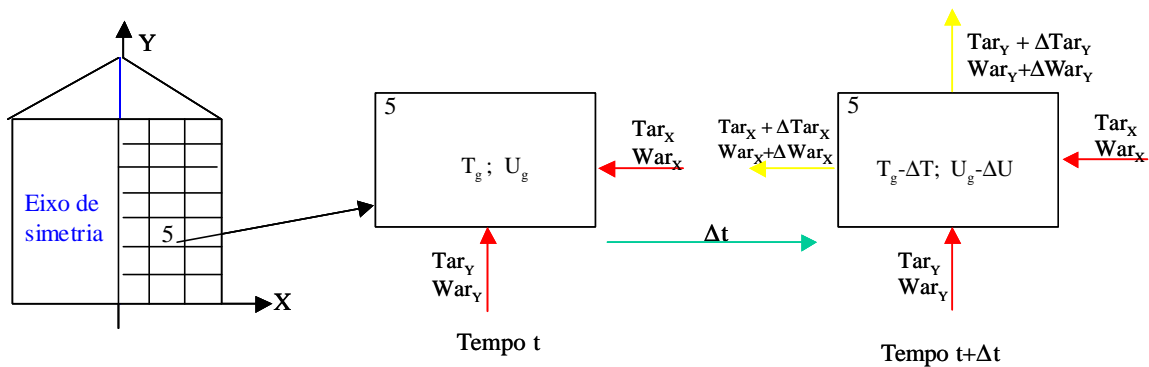


Figura 5 – Esquema da fila de elementos.

- **Rotina “SIMULA”**

“SIMULA” é uma rotina criada para simular a temperatura, o teor de umidade e a deterioração em cada elemento do sistema. Esta rotina realiza balanços de energia e de massa para cada elemento. Nesses balanços, foram consideradas as condições do ar (temperatura e umidade) que atravessa cada elemento, Figura 6. As condições de saída do ar de um elemento foram consideradas como as novas condições de entrada do ar no elemento vizinho.



em que,

Tar_m = temperatura do ar na direção m;

m = X ou Y (direções horizontal ou vertical);

War_m = razão de umidade do ar na direção m;

T_g = temperatura dos grãos;

U_g = teor de umidade dos grãos;

ΔTar_m = incremento de temperatura na direção m;

ΔWar_m = incremento de razão de umidade do ar na direção m;

ΔT = incremento de temperatura dos grãos;

ΔU = incremento de teor de umidade dos grãos;

Δt = incremento de tempo.

Figura 6 – Esquema dos balanços de massa e energia

A temperatura e o teor umidade dos grãos em cada elemento, foram determinados usando-se o modelo proposto por MOREY et al. (1976). Para os

elementos onde o ar entrava em duas faces, desenvolveu-se uma sub-rotina para determinar a mistura das duas vazões de ar.

Para calcular a entalpia específica do milho foi utilizada uma equação, determinada no Capítulo 1,

$$c_p = 0,036 \cdot U + 1,0662 \quad (1)$$

em que,

c_p = entalpia específica do milho, $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

U = teor de umidade do produto, % b.u.

A entalpia específica de vaporização da água dos grãos foi calculada por:

$$L_v = [(606 - 0,57 \cdot \theta_0) \cdot (1 + 4,35 \cdot \exp(-28,25 \cdot U))] \cdot 4,186 \quad (2)$$

em que,

L_v = entalpia específica de vaporização da água dos grãos, kJ kg^{-1}

θ_0 = temperatura inicial do milho, $^\circ\text{C}$.

Após serem determinadas as distribuições de temperatura e de teor de umidade, a deterioração do produto foi estimada pelo modelo proposto por STEELE et al. (1969).

- **Validação do modelo**

Os dados experimentais da distribuição de temperatura e teor de umidade na massa de grãos ao final de cada dia do processo de aeração, obtidos no Capítulo 3, foram utilizados para validar o modelo desenvolvido neste trabalho. Além destes dados, foram usados, também, temperaturas correspondentes a outros termopares localizados na massa de grãos, nas intersecções das distâncias verticais de 0,1 e 1,6 m com as distâncias radiais de 0; 0,6 e 1,2.

- **Hardware utilizado nas simulações**

Nas simulações foi utilizado um microcomputador com processador Pentium 4 de 1,5 Ghz e 256 Mb de memória RAM.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na discussão dos resultados, usou-se a seguinte nomenclatura para localização de pontos nas massa de grãos:

Direção (a;b)

Em que,

Direção = Norte, Sul, Leste, Oeste

A = distância vertical no silo

B = distância radial no silo

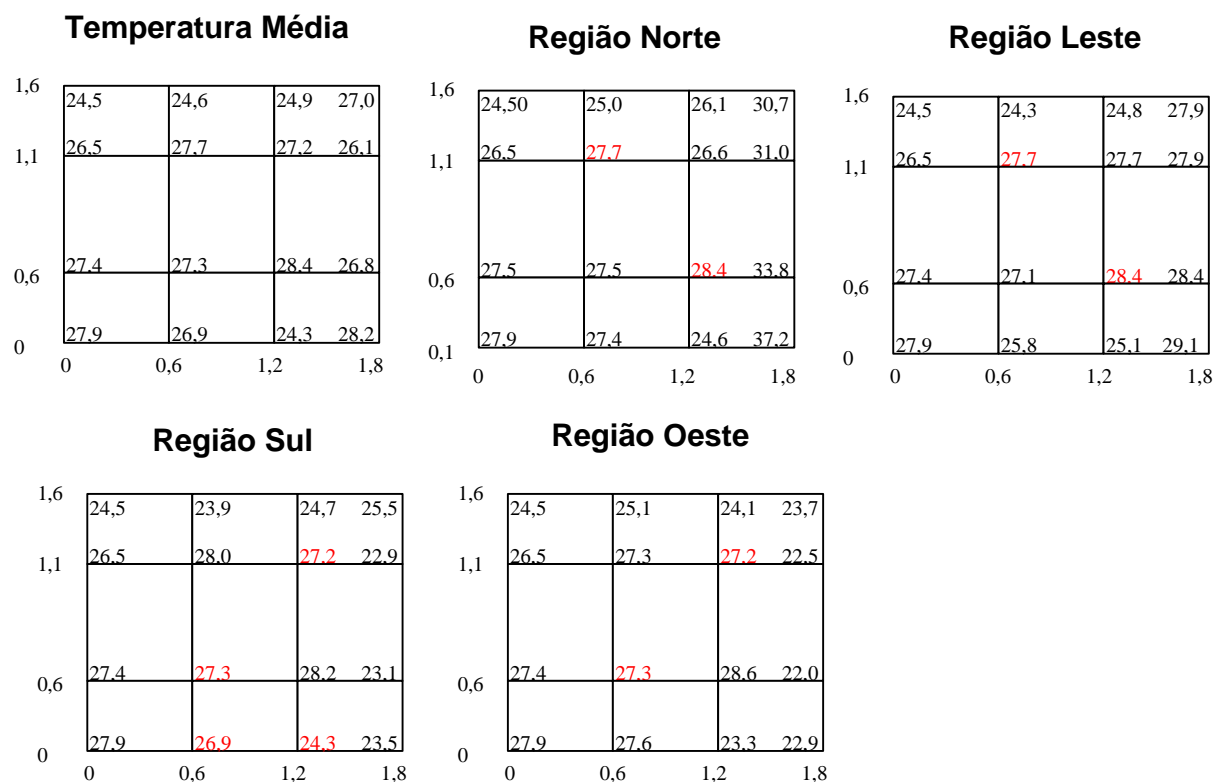
Dados de entrada para o programa

Para a obtenção das distribuições de temperatura e de teor de umidade do produto, as seguintes informações foram introduzidas no programa:

Discretização do sistema:	Mesma do Capítulo 2
Velocidades (X e Y) nos nós dos elementos:	Iguais às obtidas no Capítulo 2
Massa específica do grão:	732 kg m ⁻³
Incremento de tempo:	1 hora
Tempo total de simulação (DS):	96 horas
Teor de umidade inicial do grão (Capítulo 3):	Equação – Coeficientes na Tabela 2
Temperatura inicial do grão (Capítulo 3):	Figura 7
Temperatura do ar insuflado (°C):	17 (24 h); 16,1 (48); 17,4 (72); 17,6 (96)
Umidade relativa do ar insuflado:	73,6 (24 h); 73,8 (48); 72,5 (72); 70,2 (96)

Tabela 2 – Coeficientes das equações ajustadas ($U = A + B.h + C.r$) para expressar o teor de umidade dos grãos em cada direção

Direção	A	B	C	R ²
Norte	11,3202	2,3733	-0,9791	0,8968
Sul	10,8123	2,7600	-1,0416	0,8821
Leste	11,0738	2,6533	-0,0208	0,7557
Oeste	11,3682	2,4933	-0,14583	0,7598
Média	11,1517	2,5666	-0,5416	0,8658



Obs: valores em vermelho equivalem a médias

Figura 7 – Esquema da distribuição da temperatura inicial na massa de grãos

- **Distribuição de temperatura**

Para distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m, as Figuras 8, 9 e 10 apresentam as temperaturas no interior da massa de grãos de milho, provenientes das simulações, considerando as distâncias radiais de 0; 0,6 e 1,2 m, respectivamente. As temperaturas experimentais, medidas nos respectivos pontos, são, também, apresentadas nestas figuras.

Verifica-se, nas Figuras 8, 9 e 10, que o modelo, na maioria dos casos, tende a subestimar as temperaturas na massa de grãos, porém após o segundo dia de simulação apresenta uma boa concordância com os dados experimentais. A maior diferença entre as temperaturas experimentais e as simuladas foi de 3,5 °C e ocorreu durante o primeiro dia de simulação. Esta diferença foi menor que a obtida por MONTROSS et al. (2000), 5,7 °C, porém maior do que a obtida por

CHANG et al (1993), 1,8 °C. Nota-se, também, que os valores simulados de temperatura, em cada hora de simulação e para todas as direções investigadas, apresentaram-se muito próximos, concordando com os dados experimentais.

Observa-se a ocorrência de uma menor concordância entre os dados experimentais e simulados, Figura 10 (a), para os pontos localizados nas distâncias radial e vertical de 1,2 e 0,6 m, respectivamente.

A Tabela 3 apresenta os erros relativos médios estimados (%) referentes aos valores de temperatura, simulados e experimentais, nas diversas localizações no interior da massa de grãos. Nesta tabela são apresentados, também os erros máximos e mínimos.

Verifica-se, na Tabela 3, que o erro relativo máximo envolvido nas simulações da temperatura foi de 14% e ocorreu, principalmente, em um ponto a 0,6 e 1,1 m de distâncias radial e vertical, respectivamente. Este ponto encontra-se próximo da superfície do silo, e, provavelmente, é mais influenciado pelas condições do ambiente externo à massa de grãos. O modelo implementado não leva em consideração este tipo de influência. Observa-se, também, que o erro relativo médio não foi superior a 9%.

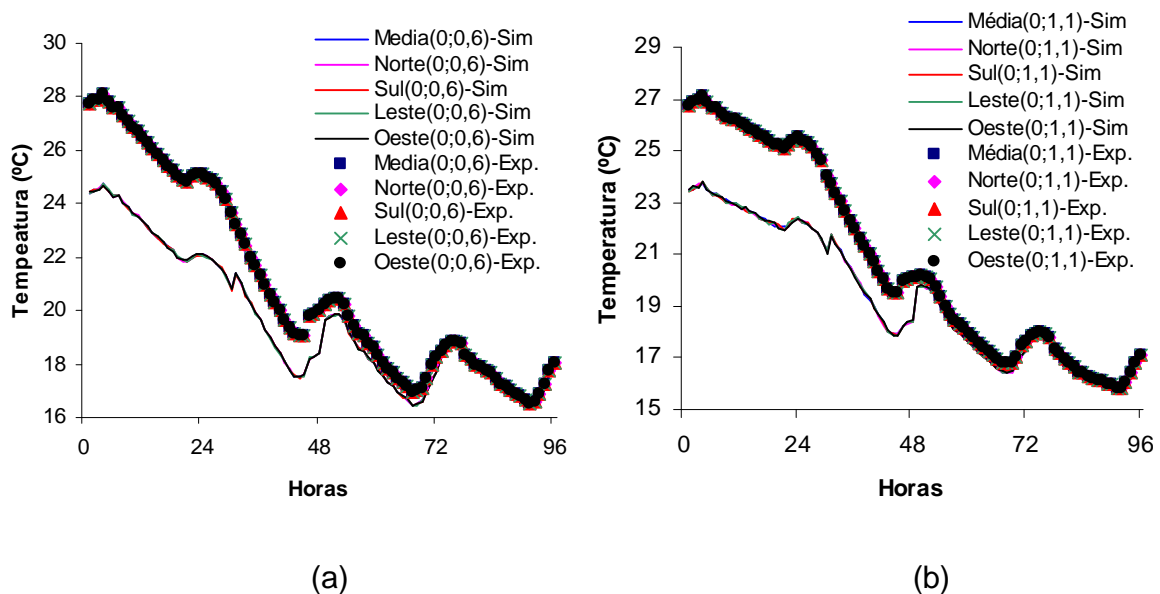


Figura 8 – Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grãos em pontos localizados a distância radial de 0 m e distâncias verticais de 0,6 (a) e 1,1 m (b)

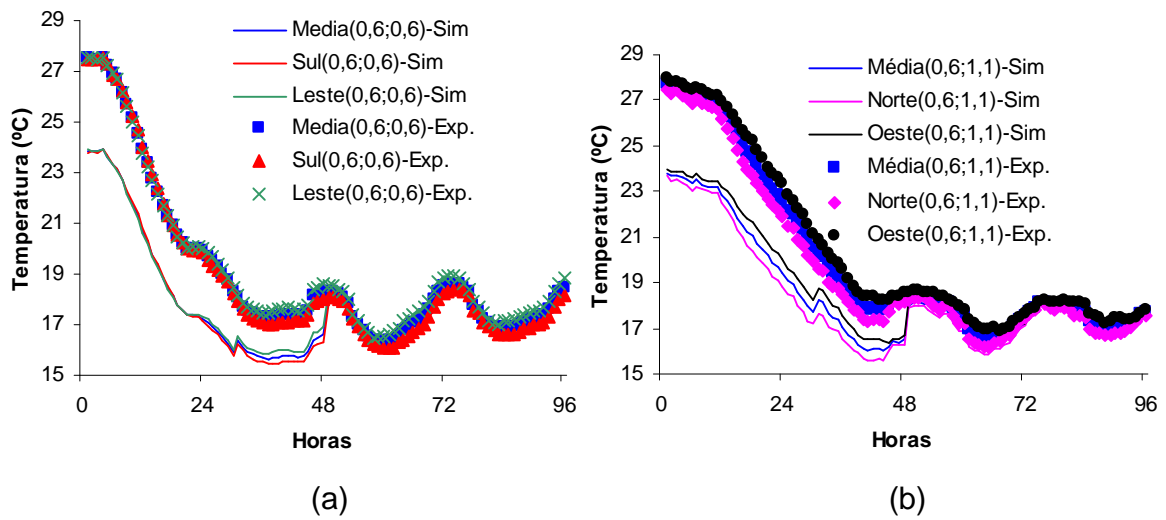


Figura 9 – Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grãos em pontos localizados a distância radial de 0,6 m e distâncias verticais de 0,6 (a) e 1,1 m (b)

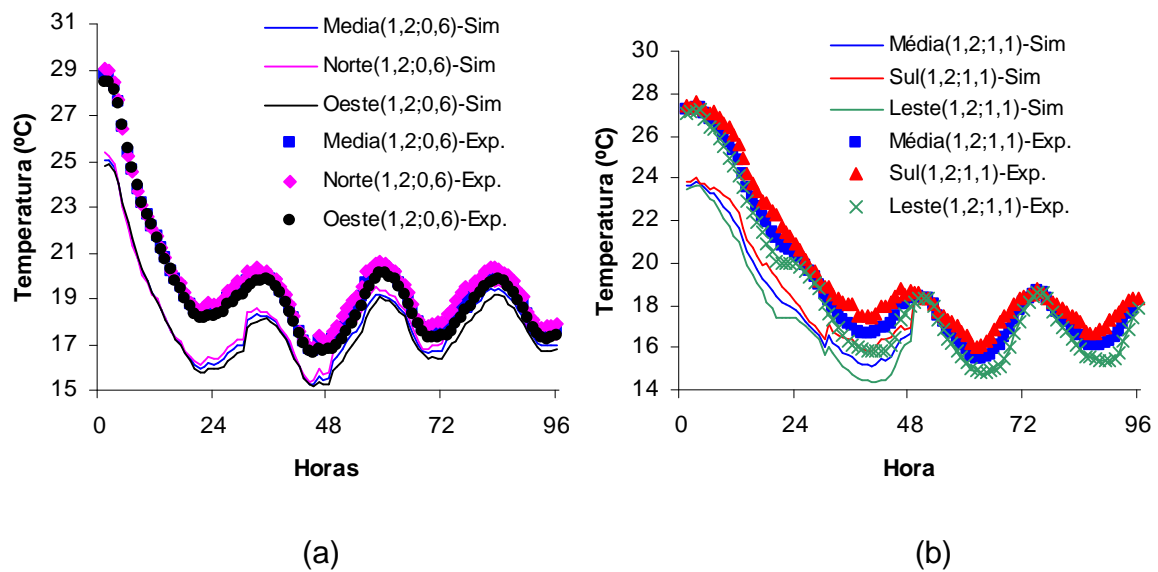


Figura 10 – Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grãos em pontos localizados a distância radial de 1,2 m e distâncias verticais de 0,6 (a) e 1,1 m (b)

Tabela 3 – Resumo dos erros relativos médios, máximos e mínimos (%) de temperatura, para as diversas localizações no interior da massa de grãos, considerando distância vertical e distância radial.

	Distância radial (m)											
	0				0,6				1,2			
	0,6*		1,1*		0,6*		1,1*		0,6*		1,1*	
	A	**	A	**	A	**	A	**	A	**	A	**
Média	6	(1-11)	7	(2-13)	6	(0-14)	7	(1-14)	8	(2-14)	6	(1-13)
Norte	6	(1-12)	7	(2-13)			7	(0-14)	8	(2-13)		
Sul	6	(1-12)	7	(2-13)	6	(0-13)					6	(1-13)
Leste	6	(1-12)	7	(2-13)	6	(0-14)					7	(3-13)
Oeste	6	(1-13)	7	(2-13)			8	(1-14)	8	(3-13)		

* Distância vertical (m)

A – Erro relativo médio

** - Faixa de variação do erro (%)

• Distribuição do teor de umidade do produto

Os teores de umidade no interior da massa de grãos de milho, provenientes das simulações, para distâncias radiais de 0; 0,6 e 1,2 m (distâncias verticais de 0,6 e 1,1 m) são apresentados nas Figuras 11, 12 e 13, respectivamente. Os teores de umidade experimentais, medidos nos respectivos pontos, são, também, apresentados nestas figuras.

Verifica-se, nas Figuras 11, 12 e 13 que a sensibilidade apresentada pelo modelo para prever as variações ocorridas experimentalmente na massa de grãos é boa. Observa-se, na Figura 13, que o modelo superestimou os valores de teor de umidade, na direção Oeste, nos pontos localizados a distância radial e vertical de 1,2 e 0,6 m, respectivamente. Provavelmente, a resposta do modelo de umidade poderia ser melhorada, se equações de entalpia específica de vaporização da água dos grãos e de umidade de equilíbrio dos grãos fossem determinadas para os grãos utilizados neste trabalho.

Nota-se que a maior diferença entre os teores de umidade experimentais e simulados foi de 0,8% b.u. e ocorreu na distância vertical de 0,6 m e distância radial de 1,2 m, na direção Oeste. Este valor é superior aos determinados por MONTROSS e MAIER, (2000) e CHANG et al. (1994) de 0,7 e 0,54 pontos percentuais, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os erros relativos médios estimados (%) referentes aos valores de teor de umidade, simulados e experimentais, nas diversas localizações no interior da massa de grãos. Nesta tabela são apresentados, também os erros máximos e mínimos.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 4, nota-se que o erro relativo máximo, envolvido nas simulações do teor de umidade da massa de grãos, foi de 8% e ocorreu em um ponto a 1,2 e 0,6 m de distâncias radial e vertical, respectivamente. Quando se considera o erro relativo médio, nota-se que foi inferior a 6%.

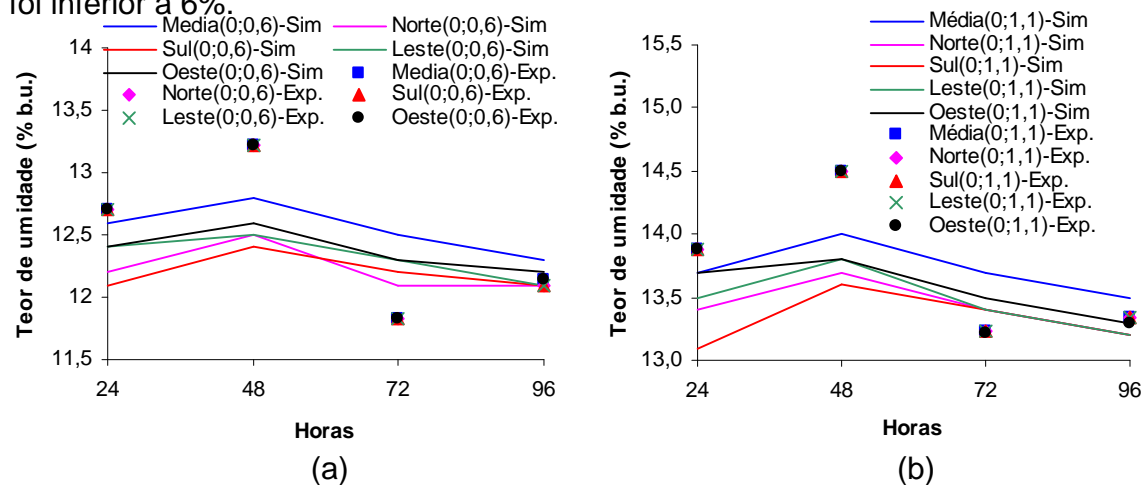


Figura 11 – Teor de umidade, experimentais e simulados, no interior da massa de grãos em pontos localizados a distância radial de 0 m e distâncias verticais de 0,6 (a) e 1,1 m (b)

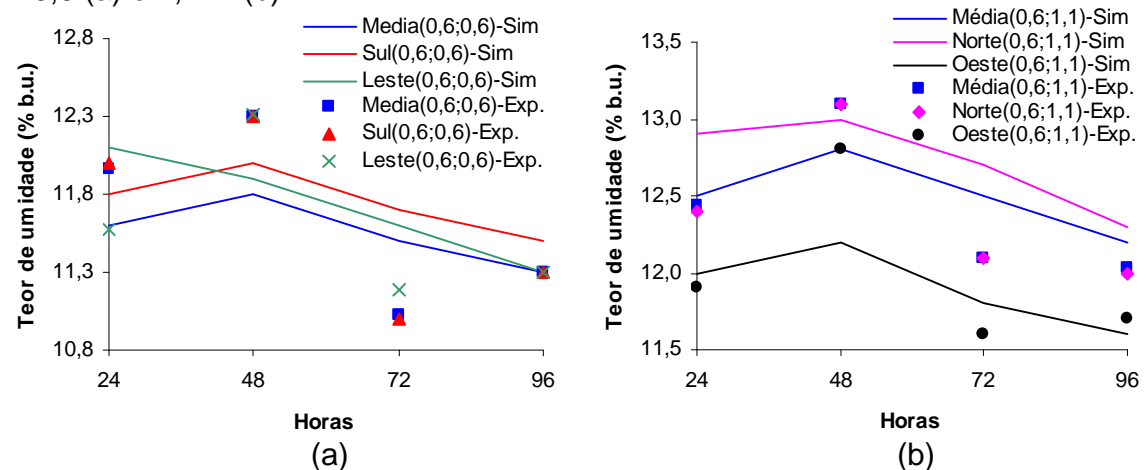


Figura 12 – Teor de umidade, experimentais e simulados, no interior da massa de grãos em pontos localizados a distância radial de 0,6 m e distâncias verticais de 0,6 (a) e 1,1 m (b)

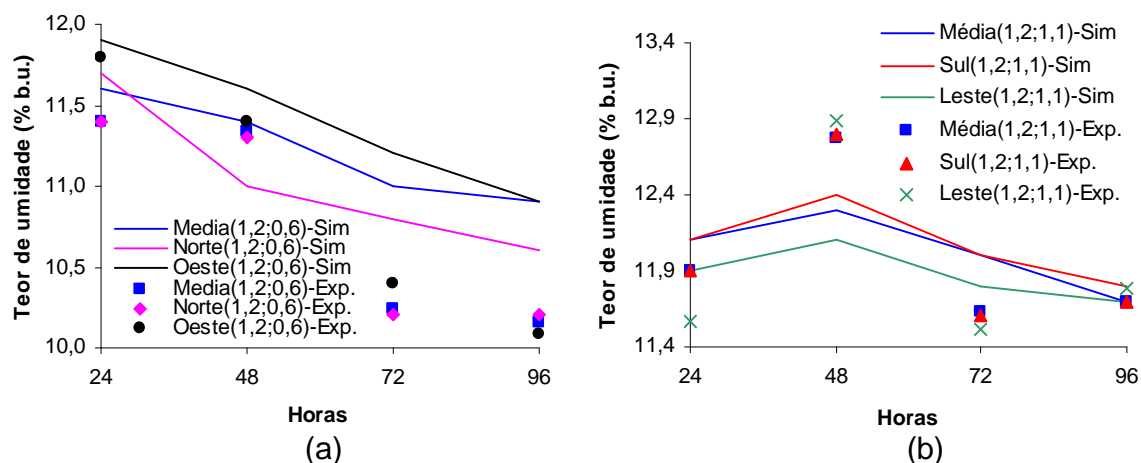


Figura 13 – Temperaturas, experimentais e simuladas, no interior da massa de grãos em pontos localizados a distância radial de 1,2 m e distâncias verticais de 0,6 (a) e 1,1 m (b)

Tabela 4 – Resumo dos erros relativos médios, máximos e mínimos (%) de teor de umidade, para as diversas localizações no interior da massa de grãos, considerando distância vertical e distância radial.

	Distância radial (m)											
	0				0,6				1,2			
	0,6*		1,1*		0,6*		1,1*		0,6*		1,1*	
	A	**	A	**	A	**	A	**	A	**	A	**
Média	3	(1-6)	2	(1-4)	3	(0-4)	2	(0-3)	4	(1-7)	2	(0-4)
Norte	3	(0-5)	3	(1-6)			3	(1-5)	4	(3-6)		
Sul	3	(0-6)	4	(1-6)	3	(2-6)					2	(1-3)
Leste	3	(0-5)	2	(1-5)	3	(0-4)					3	(1-6)
Oeste	3	(1-5)	2	(0-5)			2	(1-5)	5	(1-8)		

* Distância vertical (m)

A – Erro relativo médio

** - Faixa de variação do erro (%)

• Deterioração dos grãos

Os valores relativos à deterioração dos grãos, desenvolvido neste trabalho, são apresentados na Tabela 5. Verifica-se que a deterioração dos grãos (perda de matéria seca) nos quatro dias de simulação foi, em média, de $2,8 \times 10^{-4}\%$ e no máximo de $4,8 \times 10^{-4}\%$. Este valores são inferiores ao recomendado como máximo, 0,5%, e encontram-se próximos aos apresentados por THOMPSON (1972) e BROOKER e DUGGAL (1982).

Tabela 5 – Deterioração dos grãos (%) determinadas pelo modelo de simulação em diversos pontos na massa de grãos

	Distância radial (m)					
	0		0,6		1,2	
	0,6*	1,1*	0,6*	1,1*	0,6*	1,1*
	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$
Média	1,9	3,3	4,7	3,7	1,5	3,9
Norte	1,7	3,5	1,5	3,6	0,8	2,4
Sul	1,3	3,3	1,0	3,6	0,6	2,0
Leste	1,7	3,4	2,3	4,4	2,2	4,6
Oeste	1,9	3,8	2,7	4,5	4,0	4,8

* Distância vertical (m)

- **Tempo de simulação**

O tempo de simulação foi de, aproximadamente, um minuto utilizando-se hardware descrito anteriormente e nas condições deste trabalho.

- **Recomendação para trabalhos futuros**

Recomenda-se para trabalhos futuros, com este modelo, que:

- Seja determinada uma equação para entalpia específica de vaporização da água dos grãos e de umidade de equilíbrio para a cultivar a ser avaliada.

CONCLUSÕES

As análises dos dados e a interpretação dos resultados obtidos nos testes de aeração permitiram concluir que:

1 – O modelo implementado mostrou-se adequado para prever as distribuições de temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos.

2 – Os erros relativos médios, envolvidos nos valores simulados de temperatura e de teor de umidade foram inferiores a 9 e 6%, respectivamente.

3 – O modelo implementado, tendeu a subestimar os valores de temperatura. O erro relativo máximo envolvido nos valores simulados de temperatura foi de 14%.

4 – O maior desvio entre as temperaturas experimentais e simuladas foi de 3,5 °C e ocorreu no primeiro dia de simulação; e

5 – O erro relativo máximo, para os valores simulados de teor de umidade, foi de 8%. O maior desvio nos valores simulados de umidade foi de 0,8% b.u.

LITERATURA CITADA

ABE, T.; BASUNIA, M. A. Simulation of temperature and moisture changes during storage of rough rice in cylindrical bins owing to weather variability. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, n. 65, p. 223-233, 1996.

AHO, A.V.; HOPCROFT, J.E. **Data structures and algorithms**. New York: John Wiley, 1983. 550p.

ALAGUSUNDARAM, K.; JAYAS, D.S. Airflow resistance of grains and oilseeds. **Postharvest News and Information**, Amsterdam, v. 1, n. 4, p. 279-283, 1990.

ANDRADE, E. T.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M.; VIEIRA, G. Simulação da variação da temperatura do trigo em silos elevados de concreto em função da variação da temperatura ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Universidade Federal de Lavras, 1998.

ANDRADE, E. T.; MOLIN, L.; Distribuição de temperatura em grãos armazenados em silos: modelagem por elementos finitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas. (CD-ROM).

ANDRADE, E. T. **Simulação da variação de temperatura em milho armazenado em silo metálico**. 2001, 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Distribuição de temperatura em grãos armazenados em silos: modelagem por elementos finitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas. (CD-ROM).

- BROOKER, D. B.; DUGGAL, A. K., Allowable storage time of corn as affected by heat buildup, natural convection and aeration. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, n. 3, p. 806 - 815, 1982.
- CASADA, M. E.; ALGHANNAM, A. Aerating over-dry grain in the northwest. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v. 46, n. 6, p. 1777-1784, 1999.
- 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.; CONVERSE, H. H.; STEELE, J. L. Modeling of moisture content of grain during storage with aeration. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v. 37, n. 6, p. 1891-1898, 1994.
- CHAPMAN, J. E.; MOREY, R. V.; CLOUD, H. A.; NIEBER, J. L. Airflow patterns in flat storage aeration systems. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v. 32, n. 4, p. 1368-1376, 1989.
- CONAB. Indicadores da agropecuária. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, **Brasília**, Ano X, nº 11, 2001, 50p.
- FERGUSON, W.J. A control volume finite element numerical simulation of the high temperature drying of spruce. **Drying Technology**, New York, v. 3, n.3, p. 607-634, 1995.
- FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; HAGHIGHI, K; KRUTZ.. The application of adaptive finite element analysis to heat and mass – transfer problems. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, n. 65, p. 49-60, 1995.
- GUPTA, P.; WILCKE, W. F.; MOREY, R. V.; MERONUCK, R. A. Effect of dry matter loss on corn quality. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 15, n. 5, p. 501–507, 1999.
- HAGHIGHI, K.; IRUDAYARAJ, J.; STROSHINE, R. L.; SOKHANSANJ, S. Grain kernel drying simulation using the finite element method. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 33, n. 6, p. 1957 - 1965, 1990.
- HALDERSON, J. L. Results of a grain storage study in Idaho. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 28, n. 1, p. 246-250, 1985.
- 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

- JIA, C.; SUN, D. W.; CAO, C. Computer simulation of temperature changes in a wheat storage bin. **Journal of Stored products Research**, [S.l.], v. 37, p. 165-177, 2001.
- KANUJOSO, B.; CHUNG, D. S.; SONG, A. Moisture changes in grain during aeration under warm humid conditions. **Drying technology**, New York, v. 13, n. 1e 2, p. 197-214, 1995.
- KAZARIAN, E.A.; HALL, C.W. Thermal properties of grains. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 8, n. 1, p. 33-37,48, 1965.
- LASSERAN, J. C.; NIQUET, G.; FLEURAT-LESSARD, F. Quality enhancement of stored grain by improved design and management of aeration. In: STORED PRODUCT PROTECTION. Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-product Protection., Canberra – Australia, v. 1, n. 2, p. 296 – 299, 1994
- LOMAURO, G. J.; BAKSHI, A. S. Finite element analysis of moisture diffusion in stored foods. **Journal of Food Science**. [S.l.], v. 50, p. 392 – 396, 1995.
- MARCHANT, J. A. The prediction of airflows in crop drying systems by the finite element method. **Journal Agricultural Engineering**, [S.l.], v. 21, p. 417-429, 1976.
- METZGER, J. F.; MUIR, W. E. Computer model of two-dimensional conduction and forced convection in stored grain. **Canadian Agricultural Engineering**, Saskatoon, v. 25, n. 1, p. 119-125, 1983.
- MISENER, G. C.; SHOVE, G. C. Simulated cooling of potatoes. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 28, n. 1, p. 954-961, 1976.
- MONTROSS, M. D.; MAIER, D. E. **Development and validation of a new finite element stored grain ecosystem model**. St. Joseph: ASAE, 2000. 37p. (Paper n. 00-6043).
- MOREY, R. V.; CLOUD, H. A.; NELSON, W. W. Simulation of solar energy grain drying systems. Minnesota Contribution. Agricultural Engineering Department, University of Minnesota. St. Paul, Minnesota. p. 43, 1976.
- MUTHUKUMARAPPAN, K.; GUNASEKARAN, S. Finite element simulation of corn moisture adsorption. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.39, n. 6, p. 2217-2222, 1996.
- OBALDO, L. G.; HARNER, J. P.; CONVERSE, H.H. Prediction of moisture changes in stored corn. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v. 32, n. 4, p. 1850-1858, 1991.

- QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M.; MELO, E. C. Determinação de vazões mínimas de ar para secagem de milho em baixas temperaturas na região de Viçosa, MG. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 11 e 12, n. 1 e 2, p. 31 – 36, 1986/1987.
- SAUER, D.B. **Storage of cereal grains and their products**. St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, Inc. 1992. 615p.
- SEGERLIND, L.J. **Applied finite element analysis**. New York: John Wiley, 1984. 427p.
- SILVA, J. S.; LACERDA FILHO, A. F.; DEVILLA, I. A. Aeração de grãos armazenados. In: SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, MG: Editora Aprenda Fácil, 2000. p. 261 – 277.
- STEELE, J. L.; SAUL, R. A.; HUKILL, W. V. Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.12, n. 5, p. 685 - 689, 1969.
- SUTHERLAND, J. W.; BANKS, P. J.; ELDER, W. B. Interaction between successive temperature or moisture fronts during aeration of deep grain beds. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, n. 28, p. 1-19, 1983.
- THOMPSON, T.L. Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v. 15, n. 2, p. 333 - 337, 1972.
- THORPE, G. R. Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos. **Ecological Modelling**, n. 94, p. 255-286, 1997.
- YACIUUK, G.; MUIR, W. E.; SINHA, R. N. A simulation of temperatures in stored grain. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 20, p. 245–258, 1975.

RESUMO E CONCLUSÕES

Para execução deste trabalho, foi utilizado o Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

No presente trabalho foi desenvolvido modelo para prever a distribuição de ar, da transferência de calor e de massa e da deterioração em um sistema constituído de grãos de milho armazenados em um silo metálico provido de aeração.

No modelo de distribuição de ar, o sistema modelado, consistiu de uma massa de grãos de milho (13% b.u.) contida, até uma altura de 1,6 m, em um silo metálico cilíndrico de 1,8 m de raio. O sistema foi considerado simétrico em relação ao eixo longitudinal central do silo, eixo Y. Escoamento de ar foi introduzido na parte inferior do sistema, através de uma abertura simulando um duto circular perfurado (largura de 0,2 m). A técnica de elementos finitos foi utilizada na modelagem da distribuição de ar do no silo. Considerou-se o sistema como sendo anisotrópico.

Desenvolveu-se um programa computacional, utilizando a linguagem Basic, para simular a temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos de milho armazenados em silo metálicos durante o processo de aeração. O programa é composto de uma seção de entrada de dados e de três rotinas principais: (a) rotina para determinação da vazão de ar que afluente ou efluente de cada face dos

elementos, (b) rotina para percorrer a malha de elementos, (c) rotina para simulação da temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos durante o processo de aeração.

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) e temperatura dos grãos foram medidos continuamente durante o período experimental e serviram de entrada para o modelo.

Para validação do modelo, grãos de milho (*Zea mays* L.), adquiridos pelo Centro de Produção da Universidade Federal de Viçosa, (safra 2000/2001), foram armazenados em um silo metálico, similar ao usado nas simulações. O lote continha grãos de diferentes variedades.

Dois testes usando aeração contínua (fluxo de ar de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por metro quadrado de área perfurada) nos grãos foram executados e durante os testes foram realizadas amostragens diárias em diversos pontos da massa de grãos, para determinação do teor de umidade.

Por meio das análises dos dados e interpretações dos resultados obtidos, nas condições que o trabalho foi realizado, conclui-se que:

- A utilização da técnica de elementos finitos para a predição da distribuição do fluxo de ar, em silos providos de sistema de aeração, mostrou-se satisfatória e envolveu um erro relativo médio de 6,9%.

- O modelo de distribuição de temperatura, teor de umidade e deterioração dos grãos armazenados em silo metálicos cilíndricos durante o processo de aeração mostrou-se adequado. Os erros médios envolvidos na predição da temperatura e do teor de umidade foram inferiores a 9 e 6%, respectivamente.

- A deterioração média dos grãos, estimada pelo modelo, foi de $2,8 \times 10^{-4}\%$.

- A condutividade térmica de amostras de milho ($w \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), com teor de umidade (U), na faixa de 11,3 a 18,4% b.u., pode ser expressa por:
 $K = 0,0024 U + 0,127 \pm 0,004302$.

- O calor específico de amostras de milho ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), com teor de umidade faixa de 11,3 a 18,4% b.u., pode ser expresso por:
 $C_p = 0,0636 U + 1,0662$.