

MARCELO PEREIRA COELHO

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE GRÃOS USANDO
A MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

MARCELO PEREIRA COELHO

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE GRÃOS USANDO
A MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de julho de 2009.

Prof. Márcio Arêdes Martins

Prof. Daniel Marçal de Queiroz

Prof. José Helvecio Martins

Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Prof. Adílio Flauzino de Lacerda Filho
(Orientador)

A Deus toda a glória para sempre!

À minha família, especialmente aos meus pais Célio e Dina.

Aos meus queridos tios Angélica e Hélio (sempre presentes).

AGRADECIMENTOS

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

À CoolSeed, pelo empréstimo do equipamento de refrigeração.

À CARAMURU Alimentos S.A., pelo envio da soja usada no experimento.

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

Aos Professores Adílio e Arêdes, pelas orientações e pela amizade.

Aos meus amigos da UFV Marcus, Fernando, Roberta, Michel, Zanatta, Bruna, Silvia e Douglas, pelo apoio e incentivo.

Aos amigos Wevergton, Marcilene, Cristiano (Boninho), Rodrigo, Gabriel e Fernando Botelho, pela grande ajuda – Sem vocês eu enlouqueceria.

À minha amiga Juliane (caninana), pelo apoio, pela paciência e amizade.

Aos funcionários do DEA, especialmente Catitu (Sebastião) e Édison, pela contribuição.

Ao meu tio Hélio (por ele escreveria mil teses), pelo estímulo. Saudades enormes!

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, por ter colocado pessoas tão especiais em meu caminho e não ter me deixado cair.

BIOGRAFIA

MARCELO PEREIRA COELHO, filho de Célio de Oliveira Coelho e Ondina Martins Pereira, nasceu em Piranga, no Estado de Minas Gerais, no dia 18 de junho de 1985.

Em março de 2003, iniciou o Curso de Engenharia de Produção na UFV, formando-se em agosto de 2007.

Nesse mesmo mês, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, área de concentração em Armazenamento e Processamento de Produtos Vegetais, submetendo-se à defesa da dissertação em julho de 2009.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Geral	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1. O armazenamento e a sua influência na manutenção da qualidade dos grãos.....	5
4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO	11
4.1. Equações governantes	11
4.1.1. Equação da continuidade para o ar	11
4.1.2. Equação da quantidade de movimento.....	12
4.1.3. Determinação do perfil de porosidade axial	15
4.1.4. Determinação do perfil de porosidade radial.....	17

	Página
4.1.5. Equações de energia para o ar e o grão.....	18
4.2. Equações governantes adimensionais	22
5. TRATAMENTO NUMÉRICO	24
5.1. Discretização da equação de transporte unidimensional em coordenadas cartesianas.....	24
6. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
6.1. Validação dos modelos	29
6.1.1. Estudo de um caso puramente advectivo-difusivo em regime transiente.....	29
6.1.2. Escoamento tridimensional em regime permanente em um meio poroso sem transferência de calor.....	30
6.1.3. Resfriamento de grãos de soja	32
6.1.4. Modelo acoplado de transferência de calor e massa (simulação do resfriamento de grãos de soja).....	34
6.2. Avaliação do erro numérico	36
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
7.1. Validação dos modelos propostos	38
7.1.1. Caso 1: advecção-difusão unidimensional em regime transiente	38
7.1.1.1. Estudo numérico do refinamento da malha.....	38
7.1.2. Caso 2: escoamento tridimensional em regime permanente em um meio poroso sem transferência de calor	41
7.1.3. Modelo acoplado de transferência de calor	50
8. CONCLUSÕES.....	56
9. REFERÊNCIAS	57

LISTA DE TABELAS

	Página
1. Valores de teor de água de equilíbrio (% b.u.) para diferentes valores de temperatura e umidade relativa de armazenagem da soja	6
2. Valores mínimos de umidade relativa em que ocorre o desenvolvimento de algumas espécies de fungos (temperatura entre 26 e 30 °C)	7
3. Teores máximos de água (% b.u.) que propiciam umidades relativas de equilíbrio favoráveis ao desenvolvimento de fungos (temperatura entre 25 e 30 °C)	7
4. Temperaturas mínimas, máximas e ótimas para o desenvolvimento de alguns fungos.....	8
5. Valores de k_1 , k_2 e d_p para soja e milho	14
6. Constantes para determinação da massa específica aparente em função da pressão	31
7. Características do equipamento de refrigeração	34
8. Erros em função do número de Peclet.....	39
9. Valores ajustados de ε_0 e b	44

LISTA DE QUADROS

	Página
1. Dados usados na simulação	35

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Curvas demonstrativas de custos causados por excesso de acidez de óleo	10
2. Forças que atuam em um volume de controle diferencial.....	15
3. Representação de uma malha usada para integração, com destaque para o volume I	25
4. (a) Esquema do sistema estudado e da condição de simetria para modelagem do fluxo de ar e (b) vista superior do duto de aeração	31
5. Esquema do silo utilizado para o resfriamento	33
6. Bomba de calor utilizada no resfriamento	33
7. Concentração adimensional em função da posição adimensional (malha com 804 nós).....	40
8. Concentração adimensional em função da posição adimensional (malha com 2.804 nós).....	41
9. Variação da massa específica aparente em função da pressão de grãos de milho e soja para um teor de água de 12% (b.u).....	42
10. Variação da pressão exercida pela massa de grãos em relação à altura	43
11. Perfil de porosidade axial.....	43

	Página
12. Perfil de porosidade radial próximo à parede.....	44
13. Teste de malha	45
14. Malha usada para o caso do escoamento de ar através de uma massa de grãos de milho (a) com destaque para a região de entrada (b).....	46
15. Comparação entre o perfil de velocidades experimental e simulado	47
16. Contornos de pressão.....	48
17. Vetores de velocidade	48
18. Perfis adimensionais de velocidades em três diferentes posições	49
19. Variação da temperatura e umidade relativa no dia 05/05/2009...	50
20. Variação da temperatura de resfriamento.....	51
21. Perfis de temperatura durante o resfriamento.....	51
22. Teste de malha para o problema acoplado de transferência de calor.....	52
23. Comparação entre os resultados experimentais e simulados.....	53
24. Perfis de simulados de temperatura em vários pontos da massa de grãos	54

LISTA DE SÍMBOLOS

a_v	Área do grão por unidade de volume ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$)
c	Calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
C_F	Fator de forma
D	Difusividade da água na soja ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
D_p	Diâmetro da partícula (m)
g	Aceleração da gravidade (m s^{-2})
h	Coeficiente de convecção ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
K	Permeabilidade (m^2)
M	Teor de água (kg kg^{-1})
P	Pressão (Pa)
$\dot{q}$	Taxa de geração de calor por unidade de volume (W m^{-3})
t	Tempo (s)
T	Temperatura do fluido ($^{\circ}\text{C}$)
$\vec{V}$	Vetor de velocidades (m s^{-1})
U	Razão de mistura (-)

Letras gregas

α	Difusividade térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
β	Expansividade térmica (K^{-1})
ε	Porosidade (-)
θ	Temperatura da fase sólida ($^{\circ}\text{C}$)

μ	Viscosidade do fluido ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
ρ	Massa específica do fluido (kg m^{-3})
ϕ	Esfericidade (-)
λ	Calor de vaporização da água (J kg^{-1})
τ	Tempo adimensional (-)

Subíndices

f	Fase fluida
s	Fase sólida

RESUMO

COELHO, Marcelo Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2009. **Simulação do processo de resfriamento de grãos usando a mecânica dos fluidos computacional.** Orientador: Adílio Flauzino de Lacerda Filho. Coorientadores: Márcio Arêdes Martins e Evandro de Castro Melo.

A safra de grãos 2007/2008 foi uma das maiores na história do Brasil. Foram produzidos em torno de 143,87 milhões de toneladas, com destaques para o milho e soja, que respondem por aproximadamente 84% desse total. A aeração é feita com o objetivo de manter a qualidade inicial dos grãos durante o período de armazenamento, conservando a temperatura dos grãos baixa e inibindo o desenvolvimento de pragas. Entretanto, em locais de clima tropical ou subtropical, muitas vezes, é difícil executar a aeração com ar ambiente com sucesso, sendo necessário resfriar o ar para efetua-la. Nesse contexto, a mecânica dos fluidos computacional (CFD) surge como técnica importante para predição, manipulação e estudo dos processos de resfriamento em sistemas de armazenamento de grãos. Assim, objetivou-se com este trabalho modelar o processo de resfriamento de grãos armazenados a granel utilizando a técnica de CFD aplicada a meios porosos. Foi modelado um caso advectivo-difusivo unidimensional, em regime transiente, com solução analítica conhecida. As simulações foram

realizadas variando-se o número de Péclet (Pe), com o objetivo de averiguar se o programa ANSYS CFX sp1 possui alguma limitação para a solução de problemas desse tipo. O segundo caso foi um estudo do escoamento de ar em um leito fixo poroso, considerando-se a variação da porosidade axial devido à compactação dos grãos, em que as medidas experimentais de Devilla et al. (2005) foram comparadas com os resultados obtidos nas simulações. O terceiro caso estudado foi um problema de resfriamento de grãos de soja em um leito fixo, validado com dados experimentais. No primeiro caso, verificou-se que, quanto menor o valor de Pe , maior o gradiente do escalar entre a entrada e saída da coluna (predomínio do termo difusivo). Observou-se, ainda, que para elevados valores de Pe um refinamento de malha deve ser efetuado para minimizar o efeito da falsa difusão. Entretanto, o programa computacional não apresentou limitações que impeçam a análise de problemas advec-tivo-difusivos. Os resultados obtidos pelo modelo proposto no segundo caso apresentam bom ajuste em relação aos resultados experimentais. O erro relativo associado foi baixo (6,86%), e a diferença em relação aos dados experimentais pode ser explicada pelo fato de que neste trabalho não foi considerada a variação da porosidade axial e radial pelo acúmulo de partículas finas. O modelo proposto é válido e possibilita a simulação de sistemas de escoamento de ar em silos armazenadores de grãos. Os resultados do terceiro caso indicam a boa concordância entre os dados experimentais, confirmando a validade do modelo proposto. Desse modo, conclui-se que o modelo termofluidodinâmico em meios porosos proposto para o resfriamento é válido e pode ser utilizado em outros estudos de sistemas de resfriamento de grãos.

ABSTRACT

COELHO, Marcelo Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July of 2009. **Simulação do processo de resfriamento de grãos usando a mecânica dos fluidos computacional.** Adviser: Adílio Flauzino de Lacerda Filho. Co-Advisers: Márcio Arêdes Martins and Evandro de Castro Melo.

The cropping season of 2007/2008 was one of the highest in the history of Brazil, in which were produced around 143.87 millions of tons, emphasizing corn and soybeans which corresponds approximately 84 % of this total. Aeration process aims to maintain the initial quality of the grain during storage, with the goal to keep the temperature of the grain at low levels, inhibiting the plague development. However, in tropical or subtropical sites, is difficult to successfully use aeration with the air temperature, being necessary to cool the air in order to proceed to the aeration process. In this context, the computational fluid dynamics (CFD) is an important technique to predict, manipulate and study the cooling processes in grain storage systems. Being that stated, the objective of this work was to model the cooling process of stored bulk grains utilizing the CFD technique applied to porous media. An advection-diffusion transient one-dimensional case with a known analytical solution was simulated. The simulations were made varying the Péclet number (Pe), with the goal to verify if the program ANSYS CFX

sp1 possesses any limitations regarding the solution of this kind of issues. The second case was a study of the air flow in a fixed porous bed, considering the porosity variation due to the grains compaction, in which the experimental measurements accomplished by Devilla et al. (2005) were compared with the obtained results provided by the simulations. The third studied case was a problem of soybeans cooling in a fixed bed, validated by experimental data. Concerning the first case, it was observed that lowest values of Pe led to higher scalar gradient between the entrance and exit of the column (predominance of the diffusive term). It was also observed that for high values of Pe , a downscaling of the mesh must be made to minimize the effect of false diffusion. Nonetheless, the software did not present any limitations that would not allow the analysis of the advective-diffusive problems. The obtained results through the proposed model on the second case presented a good fit in relation to the experimental data. The associated relative error is low (6.86 %) and the difference in relation to the experimental data can be explained due to the fact that the axial and radial porosity variation was not considered due to the fine accumulation. The proposed model is valid and allows the simulation of air flow systems in silos. The results of the third case demonstrate the good concordance among the experimental results, confirming the proposed model validity. Thus, it was concluded that the proposed thermo fluid dynamic model in porous media to cooling is valid and can be used in another studies of grain cooling systems.

1. INTRODUÇÃO

Os grãos são alimentos básicos na cadeia alimentar humana, sendo consumidos por homens e animais. Possuem a característica de se manterem viáveis, seja como alimento, seja como sementes, durante muito tempo depois de colhidos, se pré-processados e armazenados corretamente. Por essa razão, técnicas adequadas e padronizadas de produção, conservação e transporte são de fundamental importância para a humanidade.

A safra nacional de grãos entre 2007 e 2008 foi estimada em torno de 143,87 milhões de toneladas, com destaque para o milho e a soja, que respondem por aproximadamente 40,7 (58,58 milhões de toneladas) e 41,7% (60,05 milhões de toneladas) desse total, respectivamente (CONAB, 2008).

O armazenamento de grãos é parte integrante do sistema de pré-processamento de produtos agrícolas e tem como objetivo a preservação das características e manutenção da qualidade. Nessa fase, os grãos são submetidos a fatores físicos, químicos e biológicos, que podem interferir na sua conservação e qualidade (BROOKER et al., 1992). É necessária uma contínua proteção dos produtos armazenados contra a deterioração para evitar perdas quantitativas e de qualidade durante o armazenamento (PADIN et al., 2002).

Nesse contexto, o armazenamento é uma etapa muito importante na cadeia produtiva de alimentos. Quando mal conduzida, causa prejuízos econômicos importantes, afetando a produção de alimentos.

A temperatura e o teor de água dos grãos estão diretamente relacionados com a sua deterioração, uma vez que esses fatores influenciam a taxa respiratória do produto e dos microrganismos presentes (SAUER, 1992). A alternativa usada para a redução da temperatura de grãos armazenados é a aeração, usando ar ambiente. Entretanto esta técnica não é muito eficiente em regiões de climas tropical. Nessas regiões, a aeração não é eficiente de modo a inibir, de forma significativa, a atividade dos insetos-praga e fungos. Dessa forma, é necessário o uso de ar refrigerado artificialmente para diminuir a temperatura a índices seguros.

O desempenho dos processos de resfriamento 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; WILLIAMS, 1990). Em razão da distribuição heterogênea de impurezas e partículas finas durante a carga dos armazéns a granel, das diferentes variedades armazenadas em um mesmo silo, a distribuição do ar através da massa de grãos pode não ser uniforme, independentemente do posicionamento correto dos dutos de aeração. Por isso, quando mal conduzido o resfriamento pode se tornar ineficaz para inibir o desenvolvimento de fungos e insetos-praga em áreas onde há pouca circulação de ar, onde temperaturas elevadas são verificadas. No entanto, em áreas onde a velocidade do escoamento é muito alta podem ocorrer secagem ou umedecimento dos grãos. Desse modo, é fundamental conhecer e caracterizar o escoamento através da massa de grãos, bem como o processo de resfriamento destes, a fim de melhorar os projetos dos silos e equipamentos utilizados para o armazenamento.

A resistência que os grãos oferecem ao escoamento do ar tem sido estudada por vários pesquisadores (SHEDD, 1951; HUKILL; IVES, 1955; JAYAS et al., 1987; GINER; DENISIENA, 1996; MOLENDIA et al., 2005). Em geral, esses autores consideram que o meio é isotrópico, isto é, a resistência ao escoamento é uniforme (ALAGUSUNDARAM; JAYAS, 1990). Entretanto, essa consideração tem sido contestada por vários autores devido a diversos

fatores que a tornam pouco provável, como variações no teor de água do produto armazenado, presença de impurezas e compactação da massa de grãos (KUMAR; MUIR, 1986; JAYAS et al., 1987; KAY et al., 1989).

O processo de resfriamento de grãos, de semelhante modo, já foi estudado por pesquisadores que consideram que as temperaturas dos grãos e do ar estão em equilíbrio térmico (OLIVEIRA et al., 2007).

Existem duas abordagens básicas no projeto e análise de sistemas de engenharia que envolvem escoamento de fluidos: experimental e teórico. A primeira exige a construção de protótipos e subsequentes testes experimentais com variação dos possíveis fatores que afetam a qualidade dos grãos armazenados. A segunda envolve a solução de equações diferenciais, por meios analíticos ou numéricos (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Nesse sentido, a dinâmica de fluidos computacional (Computation Fluid Dynamics, ou CFD) é uma técnica usada para resolver sistemas acoplados de equações diferenciais que modelam o escoamento de fluido, a transferência de calor e a transferência de massa. A CFD não exclui as análises experimentais, porém possibilita o desenvolvimento preliminar de produtos, equipamentos e processos sem a necessidade de inúmeros testes experimentais.

Métodos numéricos têm sido usados na solução de problemas de escoamentos de fluidos, transferência de calor e transferência de massa, como elementos finitos e volumes finitos. Entre esses métodos, a técnica de elementos finitos vem sendo utilizada com sucesso para a resolução de diferentes problemas envolvendo escoamentos (ROJANO et al., 1998; FERGUSON, 1995; GONG; MUJUMDAR, 1995; LAI, 1980; DEVILLA, 2005). Entretanto, a abordagem de elementos finitos é mais precisa quando trata de problemas parabólicos, comumente encontrados em problemas na mecânica de sólidos. Já a abordagem por volumes finitos é mais precisa para solução de problemas hiperbólicos, que são característicos dos empecilhos de escoamento de fluidos e de transferência de calor e de massa.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

A modelagem computacional auxilia, de forma rápida, a solução de diversos problemas da engenharia, mesmo complexos, com baixo custo e sem uso de protótipos, em comparação com métodos experimentais. Um estudo que viabilize a análise do desempenho de sistemas de secagem por meio da simulação computacional é necessário para a realização de projetos de equipamentos mais econômicos e eficientes. Assim, o uso de modelos que considerem as características do sistema de secagem e de aeração revela-se muito útil para desenvolver novos equipamentos e melhorar a qualidade do produto.

Objetivou-se com este trabalho modelar o processo de resfriamento de grãos, considerando a transferência de calor entre a fase sólida e a fluida, validando o modelo com dados experimentais.

2.2. Objetivos específicos

- Modelar o perfil de porosidade axial em silos armazenadores.
- Implementar e validar um modelo para o escoamento em meios porosos.
- Implementar e validar um modelo acoplado de transferência de calor e de massa capaz de prever o processo de resfriamento em uma massa de grão de soja.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. O armazenamento e a sua influência na manutenção da qualidade dos grãos

A massa de grãos constitui um ecossistema formado por elementos abióticos, como o ar e as impurezas, e por elementos bióticos, como grãos, fungos, insetos-praga etc. A conservação dos grãos depende da modificação de fatores intrínsecos e extrínsecos. Os primeiros são aqueles relacionados com as propriedades dos grãos, como teor de água, composição química e resistência da estrutura de proteção a perfurações causadas por insetos-praga. Já os fatores extrínsecos são relacionados ao ambiente em que a massa de grãos se encontra. Os fatores mais relevantes são: umidade relativa, temperatura e concentração dos gases que compõem a atmosfera intergranular (BROOKER et al., 1992; LACERDA FILHO et al., 2003).

Em regiões de climas tropical e subtropical, o armazenamento de grãos em ambiente natural não é recomendado, uma vez que nessas regiões as temperaturas e umidades relativas são elevadas (ABBA; LOVATTO, 1999). Nessas condições de armazenamento, os grãos perdem mais massa seca (quebra técnica) devido à sua movimentação, respiração, infecção por fungos e insetos (CELARO et al., 2006).

A atividade respiratória do grão resulta na produção de gás carbônico, água e calor. Com a produção de calor e de água, a atividade biológica se

intensifica, levando à produção de mais calor e água e elevando a temperatura e a umidade relativa do ar intergranular. Assim, o ambiente torna-se cada vez mais propício à infestação por insetos-praga, ácaros e fungos, além de intensificar o metabolismo dos grãos, o que causa variações físico-químicas e fisiológicas e aumenta as perdas de matéria seca (BROOKER et al., 1992; NAVARRO; NOYES, 2002).

Nas oleaginosas, o teor máximo de água dos grãos indicado para a armazenagem por um período entre seis meses e um ano, em ambiente natural, deve ser inferior a 10% (b.u.). Entretanto, no Brasil, por forças normativas de padronização e classificação comercial, a soja pode ser comercializada com teores de água de até 14% (b.u.). Assim, esse grão, muitas vezes, é armazenado com esse teor de água, ou superior, o que é considerado muito elevado para as condições de armazenamento em ambiente natural, por ativar mecanismos fisiológicos dos grãos que permitem elevar a umidade relativa de equilíbrio do ar intergranular.

A Tabela 1 apresenta valores de teores de água de equilíbrio da soja para diferentes valores de temperatura e de umidade relativa. Observa-se que, quanto menor a temperatura da massa de produto, para a mesma umidade relativa do ar intergranular, maior o teor de água dos grãos durante a armazenagem.

Tabela 1 – Valores de teor de água de equilíbrio (% b.u.) para diferentes valores de temperatura e umidade relativa de armazenagem da soja

	T (°C)	UR de Equilíbrio (%)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
Soja	15	1,5	3,94	5,83	7,53	9,22	10,99	12,99	15,47	19,15	18,86
	20	1,21	3,66	5,55	7,21	8,96	10,75	12,76	15,25	18,95	28,71
	25	0,92	3,38	5,29	7,02	8,72	10,51	12,53	15,04	18,76	28,56
	30	0,64	3,12	5,04	6,78	8,49	10,29	12,32	14,83	18,57	28,41
	35	0,38	2,87	4,79	6,54	8,26	10,07	12,11	14,64	18,39	28,28

Fonte: Equação de Chung e Pfost (SILVA et al., 2000).

O comportamento das principais espécies de fungos que infectam os grãos durante o armazenamento foi estudado por Christensen e Kaufmann (1975), que consideraram a temperatura e umidade relativa do ar intergranular e, também, a temperatura e o teor de água dos grãos. As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam informações, publicadas por esses autores, que permitem definir os valores críticos para inibir o desenvolvimento desses microrganismos.

Tabela 2 – Valores mínimos de umidade relativa em que ocorre o desenvolvimento de algumas espécies de fungos (temperatura entre 26 e 30 °C)

Espécie de Fungo	Umidade Relativa (%)
<i>Aspergillus halophilicus</i>	68
<i>Aspergillus restrictus</i> , <i>Sporedonema</i>	70
<i>Aspergillus glaucus</i>	73
<i>Aspergillus candidus</i> e <i>A. ochraceus</i>	80
<i>Aspergillus flavus</i>	85
<i>Penicillium</i> , dependendo da espécie	80-90

Fonte: CHRISTENSEN; KAUFMANN, 1975.

Tabela 3 – Teores máximos de água (% b.u.) que propiciam umidades relativas de equilíbrio favoráveis ao desenvolvimento de fungos (temperatura entre 25 e 30 °C)

Umidade Relativa (%)	Soja	Trigo, Milho e Sorgo	Arroz		Girassol	
			Casca	Polido	Semente	Alimento
65	12,5	12,5-13,5	12,5	14,0	8,5	5,0
70	13,0	13,5-14,5	13,5	15,0	9,5	6,0
75	14,0	14,5-15,5	14,5	15,5	10,5	7,0
80	16,0	15,5-16,5	15,5	16,5	11,5	8,0
85	18	18,0-18,5	16,5	17,5	13,5	9,0

Fonte: CHRISTENSEN; KAUFMANN, 1975.

Tabela 4 – Temperaturas mínimas, máximas e ótimas para o desenvolvimento de alguns fungos

Espécie de Fungo	Temperaturas (°C)		
	Mínimas	Ótima	Máximas
<i>Aspergillus restrictus</i>	5-10	30-35	40-45
<i>Aspergillus glaucus</i>	0-5	30-35	40-45
<i>Aspergillus candidus</i>	10-15	30-35	50-55
<i>Aspergillus flavus</i>	10-15	45-50	45-50
<i>Penicillium</i>	-5-10	20-25	35-40

Fonte: CHRISTENSEN; KAUFMANN, 1975.

As sementes têm vigor e germinação reduzidos durante o armazenamento, pois ocorre a peroxidação de lipídios. Em países cujo clima é semelhante ao do Brasil, essa redução é mais acentuada (CLARK; SNYDER, 1991; DHINGRA et al., 2001). Condições inadequadas de armazenamento fazem que os grãos fiquem sujeitos a rancidez hidrolítica, causada pela hidrólise na soja (ARAÚJO, 2004). O armazenamento de oleaginosas com teor de água elevado e em temperaturas elevadas causa perda na qualidade do óleo bruto, refinado, branqueado e desodorizado (ORTHOEFER, 1978).

Segundo Liu (1997), em estudos realizados com soja a redução da sua qualidade durante a armazenagem foi caracterizada pela queda da viabilidade e germinação, coloração e diminuição da absorção de água e variação na composição química e na qualidade da proteína e do óleo. Esse autor afirmou que os danos provocados pelo calor são as maiores causas da perda de qualidade.

Araújo (2004) verificou que a hidrólise é responsável pelo aumento da acidez e oxidação dos ácidos graxos e, também, pela alteração das propriedades funcionais. Portanto, o armazenamento inadequado pode causar grandes prejuízos às indústrias produtoras de óleo. Como exemplo, grãos de soja recém-colhidos apresentam índices de acidez baixos, variando entre 0,3 e 0,5%. Ao longo do armazenamento, esse teor aumenta naturalmente, podendo chegar a 3%, ou mais, quando armazenado em

condições inadequadas (DRYAERATION, 2000). A elevação dos índices de acidez gera custos adicionais na produção de óleo refinado, como:

- 1) Perda de produto: a acidez do óleo bruto provoca perda física, em massa de óleo, por formar saponificáveis, cujo valor comercial é extremamente reduzido em comparação com o valor do óleo.
- 2) Neutralização da acidez: devido à utilização de substâncias químicas neutralizantes da acidez até os níveis desejados do potencial hidrogeniônico do óleo comercial.
- 3) Perda de fosfolipídios: esta perda é desprezível para o óleo com teor de acidez abaixo de 1%. No entanto, a partir desse valor, com o aumento da acidez, essa perda passa a ser significativa.
- 4) Custo do ácido fosfórico: este ácido é usado para corrigir o teor de fosfolipídios.
- 5) Energético: refere-se ao custo da energia necessária para a neutralização da acidez.
- 6) Mão de obra: refere-se ao custo de mão de obra utilizada para o manuseio de máquinas, equipamentos e laboratórios.
- 7) Manutenção e limpeza: referem-se aos custos de manutenção e reposição de peças e componentes do sistema e à limpeza e higienização para a realização das atividades.

A Figura 1 ilustra, em um exemplo, os custos e prejuízos causados, devido ao aumento do índice de acidez observado durante o armazenamento, ao processamento de 120 t/dia de soja (DRYAERATION, 2000).

Christensen e Kaufmann (1977) afirmaram que é possível manter a qualidade dos grãos de soja durante o armazenamento se eles forem mantidos em baixa temperatura.

Quando a temperatura da massa de grãos é mantida abaixo de 15 °C, observa-se que há redução eficiente da atividade de água dos grãos (SUN; WOODS, 1994; SUN; BYRNE, 1998). A temperatura de armazenamento é fator crucial para a manutenção da qualidade (MAYER; NAVARRO, 2002).

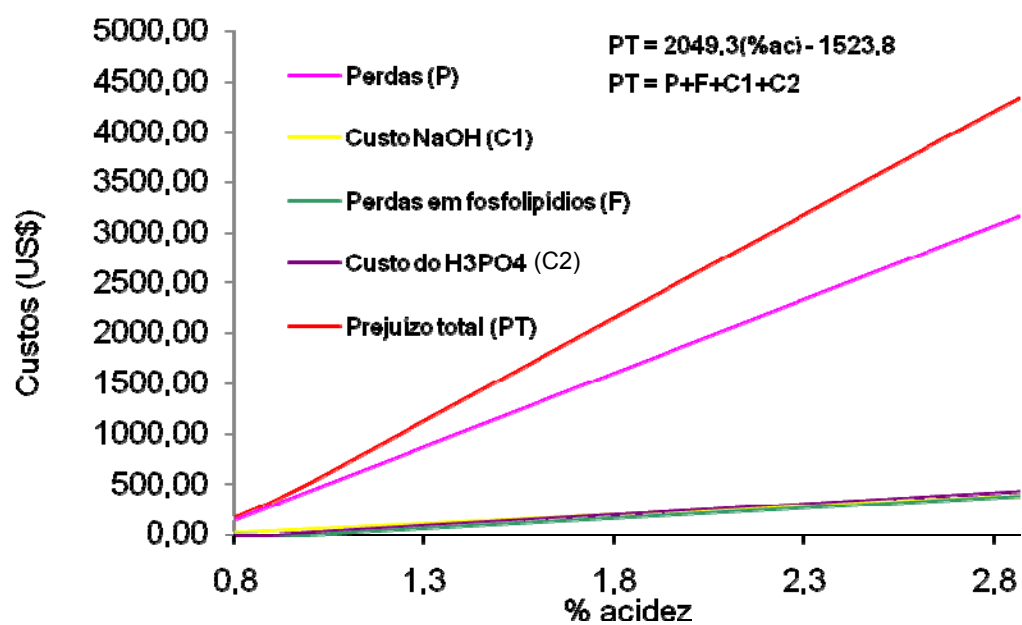


Figura 1 – Curvas demonstrativas de custos causados por excesso de acidez de óleo.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

4.1. Equações governantes

4.1.1. Equação da continuidade para o ar

A equação da continuidade para o ar úmido define que a taxa líquida da massa transferida de uma superfície de controle é igual ao acúmulo de massa no volume de controle. Desse modo:

$$\frac{D}{Dt} [\varepsilon \rho_f (1 + U)] = -\rho_s \frac{\partial M}{\partial t} \quad (1)$$

em que:

$\frac{D}{Dt}$ = derivada material;

U = razão de mistura kg kg^{-1} ;

ρ_f = massa específica da fase fluida, kg m^{-3} ;

ρ_s = massa específica da fase sólida, kg m^{-3} ;

ε = porosidade do meio;

$\frac{\partial M}{\partial t}$ = taxa de secagem ou umedecimento, s^{-1} ; e

M = teor de água do grão.

A equação da continuidade para o ar seco define que a taxa líquida de massa transferida de uma superfície de controle é igual à taxa que deixa o volume de controle. Assim:

$$\frac{D}{Dt}[\varepsilon \rho_f] = 0 \quad (2)$$

Combinando as equações (1) e (2) e expandindo a derivada material, obtêm-se a equação da continuidade para a umidade do ar:

$$-\frac{\rho_s}{\varepsilon \rho_f} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t} + \vec{V} \nabla U \quad (3)$$

4.1.2. Equação da quantidade de movimento

A equação (4), da quantidade de movimento em meios porosos, pode ser definida como (KAVIANY, 1995):

$$\frac{\rho_{ar}}{\varepsilon} \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla P + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{V} - \vec{m} - \rho_{ar} \vec{g} \beta (T - T_{ref}) \quad (4)$$

em que:

∇P = gradiente de pressão, Pa m⁻¹;

β = coeficiente de expansão térmica, K⁻¹;

$\vec{m}$ = força resistiva resultante da interação entre o fluido e o meio, N m⁻³;

μ = viscosidade do ar kg m⁻¹ s⁻¹; e

T = temperatura do ar, K.

A viscosidade do ar é calculada pela seguinte equação (BROOKER et al., 1992):

$$\mu = 1,7153 \cdot 10^{-5} + 4,6028 \cdot 10^{-8} T \quad (5)$$

Quando o escoamento é uniforme e suficientemente grande para tornar o termo de flutuação desprezível, a equação (4) pode ser simplificada como:

$$0 = -\nabla P + \vec{m} \quad (6)$$

A força resistiva pode ser calculada pela equação (7) (MASSARANI, 1999).

$$\vec{m} = \frac{\mu}{K} \vec{V} + \frac{C_F \rho_{ar}}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V} \quad (7)$$

em que:

C_F = coeficiente de forma; e

K = permeabilidade do meio (m^2).

A permeabilidade pode ser obtida por meio de uma equação semi-heurística, em função da porosidade (ε), da esfericidade (ϕ) e do diâmetro de partícula (D_p).

A combinação das equações (6) e (7) é conhecida como equação de Darcy, e o segundo termo dela é conhecido como extensão de Forchheimer e pode ser desprezado caso $Re_{\sqrt{K}} = \frac{V\sqrt{K}}{\nu} \geq 0,2$ (KAVIANY, 1995).

Pela equação de Darcy, é possível calcular a perda de carga por meio da estimativa do cálculo da força resistiva.

Ergun (1952) definiu a perda de carga por meio da equação (8).

$$\nabla P = \frac{\mu}{K} \vec{V} + \frac{C_F \rho_{ar}}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V} \quad (8)$$

Os coeficientes K e C_F são calculados pelas equações (9) e (10), respectivamente.

$$K = \frac{(D_p \phi)^2 \varepsilon^3}{150(1 - \varepsilon)^2} \quad (9)$$

e

$$C_F = \frac{0,14}{\varepsilon^{1,5}} \quad (10)$$

Para o escoamento através de produtos agrícolas, entretanto, as equações (9) e (10) devem ser modificadas, uma vez que estas são dependentes de fatores cujos comportamentos são bastante irregulares e aleatórios para produtos de origem vegetal, por exemplo o diâmetro de partícula (MOLEND A et al., 2005). Por essa razão, as equações (9) e (10) foram assim modificadas:

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{2k_1(1 - \varepsilon)^2} \quad (11)$$

e

$$C_F = \frac{\sqrt{k_1}}{2k_2} \frac{1}{\varepsilon^{1,5}} \quad (12)$$

em que:

k_1 e k_2 = constantes que dependem do produto; e

d_p = diâmetro de partícula equivalente.

O diâmetro de partícula equivalente (d_p) pode ser determinado de forma empírica, conforme metodologia apresentada por Li e Sokhansanj (1994).

Os valores de k_1 , k_2 e d_p para soja e milho são mostrados na Tabela 5 (MOLEND A et al., 2005):

Tabela 5 – Valores de k_1 , k_2 e d_p para soja e milho

Produto	k_1	k_2	d_p (10^{-3} m)
Soja	113,2	1,628	5,84
Milho	191,2	2,176	7,36

4.1.3. Determinação do perfil de porosidade axial

Muitos autores trabalham com a hipótese de que o meio poroso seja isotrópico, axial e radialmente (ALAGUSUNDARAM; JAYAS, 1990). Entretanto, a massa específica aparente varia com a pressão exercida pelos grãos localizados nas camadas superiores. Essa variação de massa específica é causada pela compactação dos grãos, que reduz os espaços vazios.

Na Figura 2, representam-se as forças que atuam em um volume de controle diferencial.

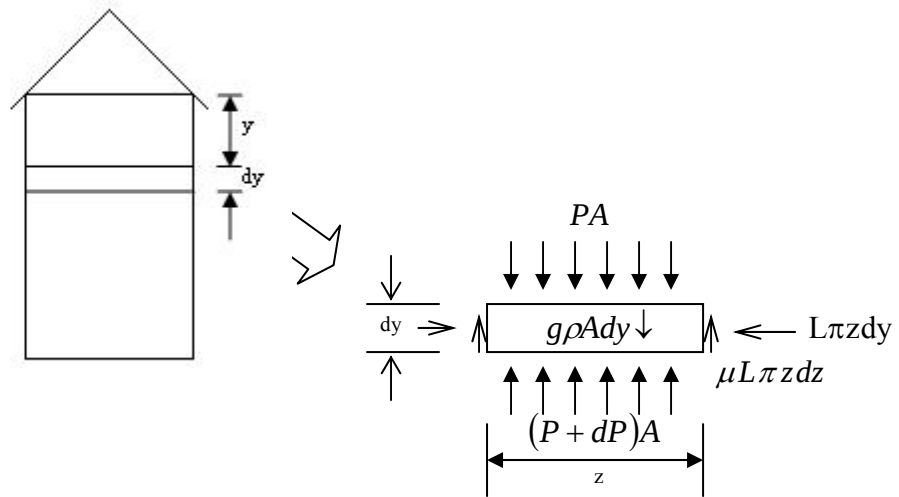


Figura 2 – Forças que atuam em um volume de controle diferencial.

Pela segunda lei de Newton, tem-se que (equações 13 e 14):

$$(P + dP)A - PA + \mu' L \pi z dy = \rho g A dy \quad (13)$$

ou, ainda:

$$\frac{dP}{dy} A dy + \mu' L \pi z dy = \rho g A dy \quad (14)$$

em que:

P = pressão vertical, Pa;

L = pressão horizontal, Pa;

μ' = coeficiente de atrito dos grãos; e

z = diâmetro, m.

Reorganizando a equação (14) tem-se a Equação (15).

$$\frac{dP}{dy} = \rho g - \frac{\mu' L \pi z}{A} \quad (15)$$

Definindo o raio hidráulico (equação 16) e a constante κ (equação 17) (RAVENET, 1977):

$$R_h = \frac{A}{\pi z} \quad (16)$$

$$\kappa = \frac{L}{P} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (17)$$

em que φ = ângulo de repouso.

Desse modo, a equação (15) é reescrita na forma da equação 18.

$$\frac{dP}{dy} = \rho g - \left(\kappa \frac{\mu'}{R_h} \right) P \quad (18)$$

Ross et al. (1979) ajustaram a equação (19) para calcular a massa específica aparente de grãos de milho, em função da pressão (P) e do teor de água (M):

$$\begin{aligned} \rho_{ap} = & 919,8 + 1,142 \cdot 10^{-3} P - 21,14 M + 0,520 M^2 \\ & - 0,0754 \cdot 10^{-3} P M + 0,00430 \cdot 10^{-3} P M^2 \end{aligned} \quad (19)$$

Thompson et al. (1987) ajustaram a equação (20) para determinar a massa específica aparente de grãos em função da pressão (P) para o teor de água de 12% (b.u.).

$$\rho_{ap} - \rho_{ap0} = a_1 P^{0.5} + a_2 P \quad (20)$$

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

ρ_{ap0} = massa específica aparente inicial, kg m^{-3} .

A equação (18) pode ser resolvida pelo método de Runge-Kutta. A partir da equação algébrica da pressão em função da posição (y), pode-se determinar a massa específica aparente em função de y e, assim, obter o perfil de porosidade do meio (ε) ao longo da direção axial do silo (equação 21):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho} \quad (21)$$

em que:

ρ_{ap} = massa específica aparente (kg m^{-3}); e

ρ = massa específica real (kg m^{-3}).

4.1.4. Determinação do perfil de porosidade radial

O perfil de porosidade radial tem sido estudado por diversos pesquisadores (NEGRINI et al., 1999; BENENATI; BROSILOW, 1962).

De acordo com Bear (1972), uma matriz porosa é dita contínua quando a retirada de um poro não altera significativamente a porosidade global. Desse modo, quando a relação entre o diâmetro do silo e o diâmetro da partícula é grande ($D/d_p > 10$), como no caso de silos armazenadores, o meio pode ser considerado contínuo. Benenat e Brosilow (1952) determinaram, de forma empírica, o perfil de porosidade radial, válido para meios porosos contínuos, compostos por partículas esféricas, dado pela equação:

$$\varepsilon = 0,38 + 0,62 \exp(-1,70x^{0,434}) \cos(6,67x^{1,13}) \quad (22)$$

em que:

$$x = \frac{R-r}{D_p} \quad (23)$$

em que:

R = raio do silo, m;

r = posição, m; e

D_p = diâmetro de partícula, m.

Existem também equações teóricas para o cálculo dessa porosidade que consideram o decaimento exponencial da porosidade (NEGRINI et al., 1999). Assim:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[1 + \Phi \exp\left(-\Psi \frac{R-r}{D_p}\right) \right] \quad (24)$$

em que:

Φ = fator que deve ser ajustado de modo a fazer com que $\varepsilon = 1$ quando $r = R$; e

Ψ = 6 para partículas esféricas e 8 para partículas não esféricas.

4.1.5. Equações de energia para o ar e o grão

As equações 25 e 26 descrevem o comportamento relativo à transferência de calor do ar e dos grãos (LIU; MASLIYAH, 2006).

$$\frac{D(\varepsilon \rho_f c_f T)}{Dt} = \nabla \cdot (\nabla \varepsilon k_f T) - h a_v (T - \theta) + \dot{q} \quad (25)$$

$$\frac{\partial [(1-\varepsilon) \rho_s c_s \theta]}{\partial t} = \nabla \cdot (\nabla (1-\varepsilon) k_s \theta) + h a_v (T - \theta) - \dot{q} \quad (26)$$

em que:

c = calor específico, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$;
 k = condutividade térmica, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$;
 a_v = área do grão por unidade de volume, $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$;
 $\dot{q}$ = fonte/sumidouro de calor por unidade de volume, W m^{-3} ;
 θ = temperatura do grão, K; e
 f e s = índices que se referem às fases fluida e sólida.

O ar pode ser considerado mistura binária de ar seco e vapor d'água. Desse modo, o calor específico do ar é calculado pela equação 27.

$$c_f = (c_{ar} + c_v U) \quad (27)$$

em que:

c_{ar} = calor específico do ar seco, a pressão constante, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$; e

c_v = calor específico do vapor, a pressão constante, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

A área superficial por unidade de volume e o coeficiente global de transferência de calor podem ser obtidos pelas equações (28) e (29), respectivamente (NIELD; BENJAN, 2006):

$$a_v = \frac{6(1 - \epsilon_0)}{d_p} \quad (28)$$

$$\frac{1}{h} = \frac{d_p}{(Nu)(k_f)} + \frac{d_p}{(\beta')(\phi)(k_s)} \quad (29)$$

em que:

Nu = número de Nusselt;

ϕ = esfericidade da partícula, decimal; e

β' = fator adimensional que varia de acordo com a forma das partículas
(Para partículas esféricas $\beta' = 10$).

O número de Nusselt é determinado por correlações empíricas. Em geral, é descrito em função dos números de Reynolds (Re_p) e Prandtl (Pr), tal como proposto por Nield e Benjan (2006):

$$Nu = \left(\frac{0,255}{\varepsilon} \right) Pr^{1/3} Re_p^{2/3} \quad (30)$$

A equação (30) se aplica a escoamentos com $Re_p > 100$, que são característicos dos processos de aeração.

Existem ainda muitas equações para o cálculo do coeficiente de convecção como esta, apresentada por Brooker et al. (1992):

$$h = 0,2755 c_p G_a \left(2 \frac{r_e G_a}{\mu} \right)^{-0,34} \quad (31)$$

em que:

G_a = fluxo de ar por unidade de área, $kg\ s^{-1}m^{-2}$; e

r_e = raio equivalente da partícula, m.

O termo de geração, na equação de energia (equação 32) é a taxa de entalpia transferida dos grãos para o ar e pode ser definido como (FORTES, 2004):

$$\dot{q} = \rho_g [\lambda + c_v (T - \theta)] \frac{dM}{dt} \quad (32)$$

em que:

λ = calor latente de vaporização, $J\ kg^{-1}$; e

c_v = calor específico do vapor, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$.

O teor de água nos grãos pode ser determinado pela equação (33) (BROOKER et al., 1992).

$$\frac{M - M_e}{(M_i - M_e)} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} e^{-i^2 \pi^2 D \frac{t}{r^2}} \quad (33)$$

em que:

D = difusividade efetiva da água, m^2s^{-1} (equação 34);

t = tempo, s;

M_e = teor de água de equilíbrio;
 M_i = teor de água inicial dos grãos;
 i = número do termo na série; e
 L = comprimento característica, m.

A difusividade da água nos grãos pode ser calculada pela equação (34) (BROOKER et al., 1992).

$$D = C_1 \exp\left(-\frac{C_2}{\theta}\right) \quad (34)$$

Para a soja, os valores de C_1 e C_2 são, respectivamente, $3,02 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e 4.821,11 (K)

O teor de água de equilíbrio (equação 35) pode ser obtido pela equação de Henderson, modificada (NAVARRO; NOYES, 2002):

$$M_e = 0,01 \left[\frac{\ln(1-UR)}{-50,3633 \times 10^{-5} (T + 43,016)} \right]^{1/1,3627} \quad (35)$$

em que:

UR = Umidade Relativa do ar, decimal.

Assim, a taxa de secagem/umedecimento (equação 36) pode ser determinada pela simples derivação da equação 33:

$$\frac{dM}{dt} = (M_i - M_e) \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\pi^2 D}{r^2} e^{-i^2 \pi^2 D \frac{t}{r^2}} \quad (36)$$

4.2. Equações governantes adimensionais

Partindo do princípio básico de que todos os termos de uma equação possuem as mesmas unidades (lei da homogeneidade dimensional), ao

dividir cada termo da equação por um conjunto de variáveis cujo produto tenha as mesmas dimensões, a equação torna-se adimensional.

As equações escritas na forma adimensional apresentam termos que explicam e ponderam os diversos mecanismos de transporte de massa e quantidade de movimento e de energia, além de reduzir o número de variáveis do problema. Assim, definem-se as seguintes grandezas adimensionais:

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{x}{L} & y^* &= \frac{y}{L} & z^* &= \frac{z}{L} & \tau &= \frac{t\alpha}{L^2} \\ Pe &= \frac{VL}{\alpha} & Ja^m &= \frac{c_p(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})}{[\lambda + c_v(T - \theta)]} & Nu &= \frac{hL}{k_f} \\ \theta^* &= \frac{\theta - \theta_{m\acute{i}n}}{\theta_{m\acute{a}x} - \theta_{m\acute{i}n}} & T^* &= \frac{T - T_{m\acute{i}n}}{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}} & Da &= \frac{K}{L^2} & V^* &= \frac{V}{V_{m\acute{a}x}} \end{aligned} \quad (37)$$

- x^*, y^*, z^* = posições adimensionais;
- τ = tempo adimensional;
- Pe = número de Péclet;
- Ja^m = número de Jakob modificado;
- Nu = número de Nusselt;
- θ^* = temperatura adimensional da fase sólida;
- T^* = temperatura adimensional da fase fluida;
- Da = número de Darcy; e
- V^* = velocidade adimensional.

As equações 3, 4, 26 e 27 são, então, reescritas da forma adimensional:

$$\nabla \vec{V}^* = 0 \quad (38)$$

$$\frac{D\vec{V}^*}{Dt} = -\nabla p^* + \frac{1}{\epsilon Re} \nabla \cdot \vec{V}^* - \frac{1}{Re Da} \vec{V}^* + \frac{C_F}{\sqrt{Da}} \vec{V}^* |\vec{V}^*| \quad (39)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial t} + Pe \vec{V}^* \cdot \nabla T^* = \nabla^2 T^* - Nu \frac{La_v}{\epsilon} (T^* - \theta^*) + \frac{\rho_g c_p L^2}{\epsilon k_{ar}} \frac{1}{Ja_f^m} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (40)$$

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial \tau} = \nabla^2 \theta^* + \text{Nu} \frac{\alpha_s}{\alpha_f} \frac{\text{La}_v}{(1-\varepsilon)} (T^* - \theta^*) - \frac{\rho_f c_p L^2}{(1-\varepsilon) k_f \text{Ja}_s^m} \frac{1}{\partial t} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (41)$$

As equações (38) a (41) são as formas adimensionais das equações governantes do resfriamento. Elas simplificam a análise dos problemas, reduzindo o número de variáveis que devem ser estudadas.

As equações (26) e (27) dão origem a termos-fonte complexos, de difícil implementação. Assim, é necessário entender o método de solução para garantir a estabilidade e convergência do problema.

5. TRATAMENTO NUMÉRICO

A modelagem do resfriamento de grãos dá origem a um sistema de equações acoplado e hiperbólico, cujo comportamento matemático é pouco conhecido. Segundo Maliska (2004), ao trabalhar com sistemas de equações não lineares resolvidas sequencialmente, em que acoplamentos complexos são observados, é muito difícil provar matematicamente que uma aproximação numérica é estável e convergente. Além disso, a escolha do tamanho da malha e do passo de tempo para que problemas acoplados e não lineares sejam estáveis e convergentes é tarefa difícil e exige bom conhecimento da física do problema e do método numérico empregado. Por isso, é importante entender o procedimento de discretização das equações, bem como o funcionamento do método.

5.1. Discretização da equação de transporte unidimensional em coordenadas cartesianas

A equação de transporte de um escalar qualquer (φ), como as equações 37 a 40, é representada pela equação (42), considerando-se o transporte em apenas uma direção:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}}_{\text{Termo transiente}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u\varphi)}{\partial x}}_{\text{Termo advectivo}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)}_{\text{Termo difusivo}} = \underbrace{S_\varphi}_{\text{Termo fonte}} \quad (42)$$

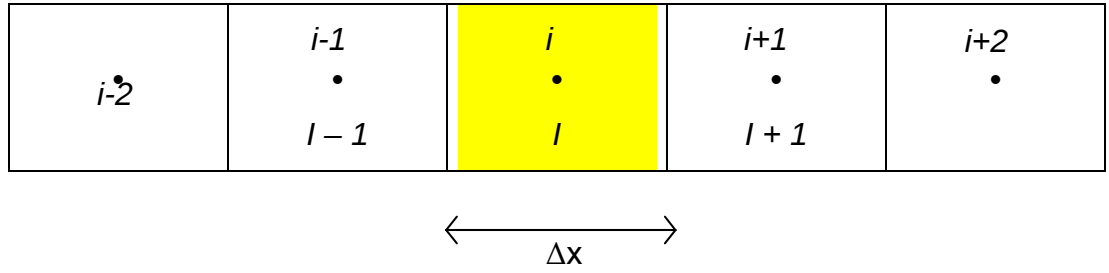


Figura 3 – Representação de uma malha usada para integração, com destaque para o volume I.

A discretização da equação (42) será efetuada pela integração de um volume finito (volume I, Figura 3), no tempo e no espaço. Considerando os volumes indeformáveis no tempo, a derivada temporal pode ser removida da integral de volume:

$$\frac{d}{dt} \int (\rho\phi) dx + \int \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} dx = \int \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx + \int S_\phi dx \quad (43)$$

Em volumes finitos, os campos são considerados constantes no interior dos volumes elementares. Então:

$$\frac{d}{dt} (\rho\phi\Delta x) + (\rho u\phi)_i - (\rho u\phi)_{i-1} = \left(\rho \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i+1} - \left(\rho \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i-1} + S_\phi \Delta x \quad (44)$$

Usando o esquema de Euler implícito para discretizar o termo transiente, o esquema de interpolação *upwind* (Upwind Differencing Scheme) para os termos advectivos e de diferenças centrais (Central Differencing Scheme) para os termos difusivos (FERZIGER; PERIĆ, 2002), obtém-se:

$$\frac{d}{dt} (\rho\phi\Delta x) = \frac{((\rho\phi)_i - (\rho\phi)_i^0)}{\Delta t} \Delta x \quad (45)$$

$$(\rho u \phi)_{i+1} = (\rho u)_{i+1} \phi_I \quad (46)$$

$$(\rho u \phi)_{i-1} = (\rho u)_{i-1} \phi_{I-1} \quad (47)$$

$$\left(\rho \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i+1} = (\rho \Gamma)_{i+1} \left(\frac{\phi_{I+1} - \phi_I}{\Delta x} \right) \quad (48)$$

$$\left(\rho \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i-1} = (\rho \Gamma)_{i-1} \left(\frac{\phi_I - \phi_{I-1}}{\Delta x} \right) \quad (49)$$

O resfriamento dos grãos é um fenômeno que envolve a transferência de calor entre duas fases (grãos e ar). Desse modo, o termo fonte tem a função de acoplar as equações de cada fase. Estudos preliminares foram realizados neste trabalho, em que se verificou que esse termo deve ser tratado corretamente para que a solução apresente convergência adequada e de forma estável.

O termo fonte não deve ser mantido constante ao longo do processo iterativo no tempo. Para tanto, é preciso linearizá-lo, de tal modo que a variável de acoplamento presente no termo não seja apenas substituída pelo seu último valor disponível. Dependendo da importância do termo, torna-se necessário atualizá-lo mais frequentemente que os outros termos (MALISKA, 2004).

A linearização pode ser do tipo:

$$S = S_p \phi_I + S_c \quad (50)$$

Caso a inclinação da reta S em função de ϕ seja negativa ($S_p < 0$), a linearização recomendada é a expansão do termo-fonte em uma série de Taylor truncada no segundo termo (equação 50). Assim, é possível determinar S_p e S_c (PATANKAR, 1980):

$$S = \underbrace{S_0}_{S_p} + \underbrace{\frac{\partial S}{\partial \phi}}_{S_c} \bigg|_I (\phi_I - \phi_I^0) \quad (51)$$

A substituição das equações (45) a (49) na equação (44) resulta na equação (52).

$$\begin{aligned} \frac{\rho(\varphi_i - \varphi_i^0)}{\Delta t} \Delta x + (\rho u)_i \varphi_i - (\rho u)_{i-1} \varphi_{i-1} = \\ (\rho \Gamma)_{i+1} \left(\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta x} \right) + (\rho \Gamma)_{i-1} \left(\frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{\Delta x} \right) + (S_p \varphi_i + S_c) \Delta x \end{aligned} \quad (52)$$

A equação (52) representa um sistema de equações contendo como incógnitas o valor de φ no volume de interesse (φ_i) e seus vizinhos (φ_{i-1} e φ_{i+1}). A equação pode ser reescrita em termos de coeficientes de uma matriz (equação 53):

$$A_i \varphi_i = A_{i+1} \varphi_{i+1} + A_{i-1} \varphi_{i-1} + B \quad (53)$$

Em que os coeficientes da equação (53) são definidos como:

$$A_i = \rho \frac{1}{\Delta t} + \frac{(\rho u)_{i+1}}{\Delta x} + \frac{(\rho \Gamma)_{i+1}}{\Delta x^2} + \frac{(\rho \Gamma)_{i-1}}{\Delta x^2} + S_p \quad (54)$$

$$A_{i+1} = \frac{(\rho \Gamma)_{i+1}}{\Delta x^2} \quad (55)$$

$$A_{i-1} = \frac{(\rho \Gamma)_{i-1}}{\Delta x^2} + \frac{(\rho u)_{i-1}}{\Delta x} \quad (56)$$

$$B = S_c + \rho \varphi_i^0 \frac{1}{\Delta t} \quad (57)$$

A discretização apresentada nas equações (44) a (57) pode ser usada para representar o transporte de qualquer escalar (temperatura, concentração, velocidades e pressão).

Problemas unidimensionais resultam em equações relativamente simples. A matriz A correspondente possui termos diferentes de zero somente na sua diagonal principal e nas diagonais imediatamente à esquerda e à direita, conforme mostrado na equação (58).

$$\begin{bmatrix} A_1^1 & A_{1+1}^1 & 0 & \dots & 0 \\ A_{1-1}^1 & A_1^2 & A_{1+1}^2 & \ddots & \vdots \\ 0 & A_{1-1}^2 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & A_{1-1}^{n-1} & A_{1+1}^n \\ 0 & \dots & 0 & A_{1-1}^n & A_1^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_{n-1} \\ \phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{n-1} \\ B_n \end{bmatrix} \quad (58)$$

Matrizes com esse arranjo são ditas tridiagonais.

Para o problema em questão, ϕ é a temperatura (do ar ou do grão) e Γ é a difusividade térmica (do ar ou do grão). Os coeficientes lineares e constantes dos termos-fonte para o ar e para o grão são descritos por meio das equações (59 e 60) e (61 e 62), respectivamente.

$$S_p^{ar} = \frac{1}{\varepsilon \rho_{ar} c_{ar}} \left(\rho_g c_v \frac{dM}{dt} - h a_v \right) \quad (59)$$

$$S_c^{ar} = \frac{1}{\varepsilon \rho_{ar} c_{ar}} \left[\theta_l^0 \left(h a_v - \rho_g c_v \frac{dM}{dt} \right) + \rho_g \lambda \frac{dM}{dt} \right] \quad (60)$$

$$S_p^g = \frac{1}{(1-\varepsilon) \rho_g c_g} \left(\rho_g c_v \frac{dM}{dt} - h a_v \right) \quad (61)$$

$$S_c^g = \frac{1}{(1-\varepsilon) \rho_g c_g} \left[T_l^0 \left(h a_v - \rho_g c_v \frac{dM}{dt} \right) + \rho_g \lambda \frac{dM}{dt} \right] \quad (62)$$

Quando os termos das diagonais da matriz são de ordens de grandeza muito diferentes, é gerada uma matriz de alta rigidez. Isso dificulta a convergência do método numérico ou, até mesmo, leva à divergência (CHAPRA; CANALE, 2008). Desse modo, a escolha do passo de tempo e do espaçamento entre os nós da malha deve ser definida de modo que os termos da matriz de coeficiente tenham ordem de grandeza semelhante e seja diagonalmente dominante.

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1. Validação dos modelos

Neste trabalho foram simulados três casos diferentes. O primeiro foi um caso de advecção-difusão em regime transiente, o segundo foi sobre escoamento em meios porosos sem transferência de calor e o último caso estudado foi o resfriamento de grãos. É importante ressaltar que os dois primeiros casos são básicos para se compreender o terceiro, que é mais complexo.

6.1.1. Estudo de um caso puramente advectivo-difusivo em regime transiente

Antes de dar início às simulações do modelo completo do processo de resfriamento, fez-se a simulação de um caso advectivo-difusivo com o propósito de verificar as limitações do programa Ansys CFX, versão 11 sp1, quanto à solução de problemas desse tipo, sobretudo quando o problema é altamente advectivo.

Problemas advectivo-difusivos em regime transiente podem ser expressos de maneira genérica pela equação 63.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0 \quad (63)$$

Foram efetuadas simulações para o transporte unidimensional de um escalar qualquer (ϕ) em um meio poroso saturado. Os resultados obtidos pela simulação foram comparados com aqueles conseguidos através da solução analítica da equação (63) (BEAR, 1979).

$$\phi(x,t) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x-ut}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{x}{D} u \right) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x+ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \right] \quad (64)$$

em que:

$\operatorname{erf}(x)$ = função-erro, definida pela equação (65).

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (65)$$

6.1.2. Escoamento tridimensional em regime permanente em um meio poroso sem transferência de calor

Para avaliar e validar o modelo proposto, o sistema esquematizado na Figura 4a, apresentado por Devilla (2005), foi modelado para grão de milho com 13% de teor de água (b.u.).

A espessura da camada de grãos era de 1,6 m, em um silo metálico, cilíndrico, com 1,8 m de raio. O ar foi insuflado na parte inferior do sistema, através de um duto circular perfurado com 0,2 m de largura, conforme o esquema mostrado na Figura 4b.

O fluxo de ar utilizado foi de $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e as velocidades de saída do ar, medidas em pontos situados a 0,3; 0,4; 0,9; 1,5; e 1,6 m a partir do centro do silo.

Os resultados da simulação foram comparados aos dados experimentais coletados por Devilla (2005).

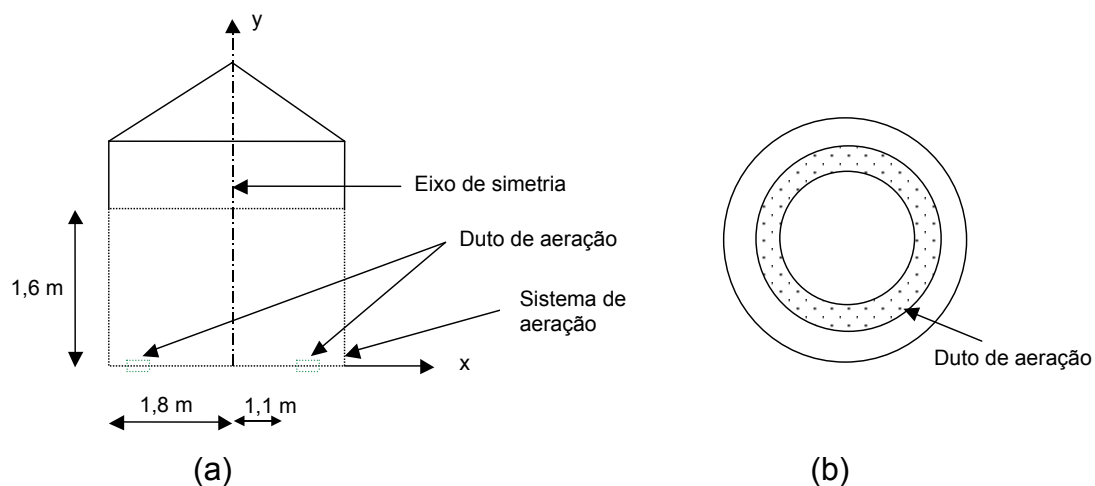


Figura 4 – (a) Esquema do sistema estudado e da condição de simetria para modelagem do fluxo de ar e (b) vista superior do duto de aeração. Fonte: DEVILLA, 2005.

O modelo proposto difere de outros por considerar a variação da porosidade axial. Para a determinação do perfil de porosidade, a equação (18) foi resolvida usando-se o método de Runge-Kutta de quarta ordem (CHAPRA; CANALE, 2008). Então, os valores da massa específica aparente foram calculados utilizando-se a equação (20). O coeficiente de atrito (μ) e a constante (κ) foram considerados constantes. Os valores de a_1 e a_2 para os produtos em estudo são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Constantes para determinação da massa específica aparente em função da pressão

Produto	a_1	a_2
Milho	5,9586	-0,2256
Soja	5,6339	-0,0594

Fonte: THOMPSON et al., 1987.

Neste trabalho, o valor do coeficiente de atrito para o milho e para a soja foi 0,45. O valor de κ é dado pela relação entre a pressão vertical e a horizontal. Neste estudo, usou-se o valor de 0,333, mas esse valor pode variar de 0,2 a 1,1 (THOMPSON et al., 1987). Por fim, o perfil de porosidades foi determinado usando-se a equação (21).

Os perfis de porosidade encontrados foram implementados nas equações 1 e 4. O modelo de perda de carga utilizado foi aquele cujos valores preditos mais se aproximaram dos dados experimentais. Posteriormente, utilizou-se o programa computacional Ansys CFX-Mesh, versão 11 sp1, para gerar malhas tridimensionais usadas para discretizar o domínio de solução.

As equações foram resolvidas pelo método de volumes finitos (apresentado anteriormente) pelo programa computacional Ansys CFX, versão 11 sp1. Os resultados simulados foram comparados com os dados experimentais obtidos para o milho (DEVILLA, 2005).

6.1.3. Resfriamento de grãos de soja

O sistema experimental de armazenamento é composto por uma bateria de seis silos com capacidade para 10 t. A soja foi armazenada em um silo central (S4, Figura 5). O sistema de termometria era composto por quatro termopares localizados no plênum, a 0,10, 2 e a 3 m acima do fundo perfurado. A pressão estática no plênum foi medida com manômetro (tubo em U). Na Figura 5, o sistema e os pontos de termometria são mostrados detalhadamente.

Para o resfriamento dos grãos, foi utilizada uma bomba de calor desenvolvida pela empresa Cool Seed Ind. e Com. de Equipamentos de Aeração Refrigerada Ltda. (Figura 6). As características técnicas do equipamento são apresentadas na Tabela 7.

O equipamento possui inversor de frequência, programado para alterar, automaticamente, a rotação do motor, em função das variações das características psicrométricas do ar ambiente.

O teste de resfriamento foi feito no dia 05/05/09, sendo os dados de temperatura monitorados em intervalos regulares de 1 h.

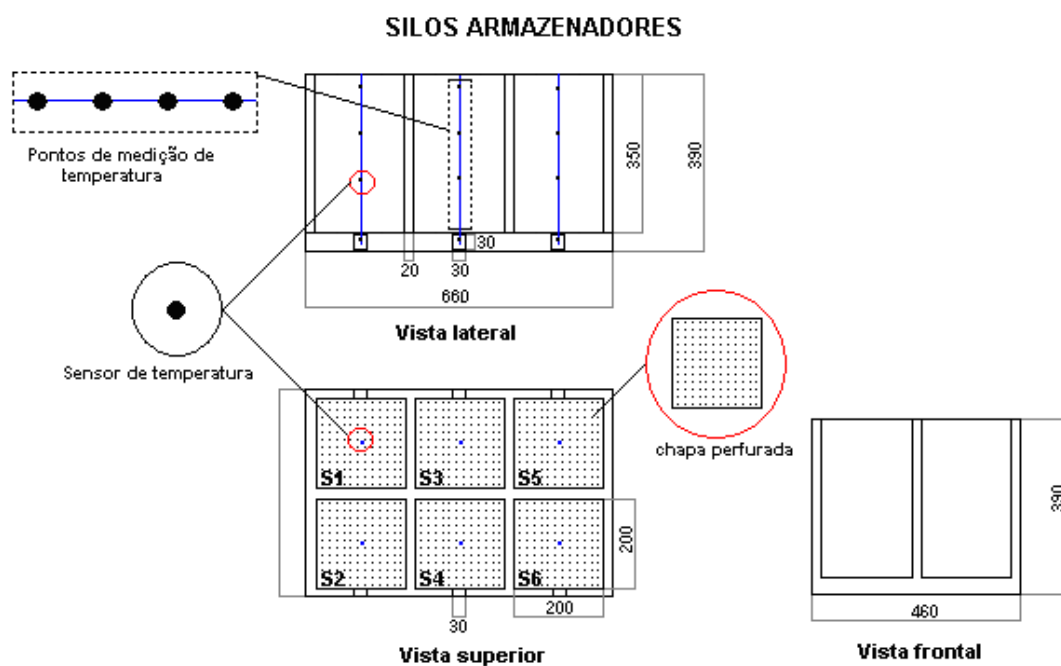


Figura 5 – Esquema do silo utilizado para o resfriamento.



A



B

Figura 6 – Bomba de calor utilizada no resfriamento.

Tabela 7 – Características do equipamento de refrigeração

Especificações	
<i>Relativa à capacidade de resfriamento</i>	
Potência de resfriamento	21,12kW (6 TR)
<i>Relativo ao ventilador</i>	
Potência máxima	2,21 kW
Rotação mínima	800 rpm
Rotação máxima	2.000 rpm

6.1.4. Modelo acoplado de transferência de calor e massa (simulação do resfriamento de grãos de soja)

As malhas usadas na discretização do domínio de soluções foram geradas no programa computacional Ansys CFX-Mesh, versão 11 sp1. As equações constitutivas do modelo foram resolvidas pelo programa computacional Ansys CFX, versão 11 sp1.

No Quadro 1, apresentam-se os dados de entrada utilizados nos estudos de simulação.

Todas as malhas geradas neste trabalho foram testadas conforme o critério:

- Primeiramente, construiu-se uma malha pouco refinada (poucos volumes).
- Posteriormente, utilizou-se uma malha com o dobro do refinamento.
- Após o passo anterior, efetuou-se um novo refinamento.

Esse processo foi repetido até que o erro (relativo), em relação a uma solução de referência, fosse menor que o valor preestabelecido (0,001).

Quadro 1 – Dados usados na simulação

Parâmetro	Valor/Equação	Unid.	Fonte
Permeabilidade (K)	$\frac{d_p^2 \varepsilon^3}{2k_1(1-\varepsilon)^2}$	m ²	Molenda (2005)
Porosidade (ε)	$\varepsilon_0(1+ae^{-by})$	-	-
Relação área/volume (a_v)	$\frac{6(1-\varepsilon_0)}{d_p}$	m ² m ⁻³	
Calor específico do vapor d'água	1952	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Incropera (2003)
Calor específico do ar seco	1005		
Calor específico do ar (c_r)	$(c_{ar} + c_v U)$		
Calor latente de vaporização (λ)	2,555E+06	J kg ⁻¹	
Condutividade térmica do ar (k_r)	0,026	W m ⁻² K ⁻¹	
Calor específico do grão (c_g)	1,699 + 0,0172M	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	Alan e Shove (1973)
Condutividade térmica do grão (k_s)	0,0316	W m ⁻¹ K ⁻¹	Assis et al. (2004)
Difusividade da água no grão (D)	$C_1 \exp\left(-\frac{C_2}{\theta}\right)$	m ² s ⁻¹	
Coefficiente de convecção (h)	$0,2755c_p G_a \left(2 \frac{r_e G_a}{\mu}\right)^{-0,34}$	W m ⁻² K ⁻¹	Brooker et al. (1992)
Viscosidade do ar (μ)	$1,7153 \cdot 10^{-5} + 4,6028 \cdot 10^{-8} T$	kg m ⁻¹ s ⁻¹	
Temperatura do ar na entrada	15,5	°C	-
Razão de Mistura (MR)	$\frac{6}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i^2} e^{-i^2 \pi^2 D \frac{t}{r^2}}$		Brooker et al. (1992)

Teor de água de equilíbrio (M _e)	$0,01 \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-50,3633 \times 10^{-5} (T + 43,016)} \right]^{1/1,3627}$	-	Navarro e Noyes, (2002)
--	---	---	-------------------------

6.2. Avaliação do erro numérico

Os erros foram calculados por meio da norma L_2 , aplicada a um domínio de cálculo (Ω), discretizada por meio de uma malha (τ), composta por volumes finitos (T), conforme as equações (66) a (68) (HERBIN, 1995).

$$\|e\|_{L_2, \Omega}^2 = \sum_{T \in \tau} \|e\|_{L_2, T}^2 = \sum_{T \in \tau} \int_T (\varphi - \varphi_h)^2 dV \quad (66)$$

em que:

$\|e\|_{L_2, \Omega}^2$ = norma de erro no espaço L_2 ;

φ = solução de referência;

φ_h = Solução de numérica; e

V = volume da malha T .

Em volumes finitos, técnica utilizada pelo programa Ansys CFX, os valores de φ e φ_h são constantes nos elementos (T) da malha (τ) de volume V . Assim, a norma é expressa como:

$$\|e\|_{L_2, \Omega}^2 = \sum_{T \in \tau} \int_T (\varphi - \varphi_h)^2 dV = \sum_{T \in \tau} (\varphi - \varphi_h)^2 \Delta V \quad (67)$$

A norma da variável φ , também medida no espaço L_2 , é dada por:

$$\|\varphi\|_{L_2, \Omega}^2 = \sum_{T \in \tau} \varphi^2 \Delta V \quad (68)$$

O erro relativo é calculado por MARTINS (2004)

$$\eta = \sqrt{\frac{\|e\|_{L_2, \Omega}^2}{\|\varphi\|_{L_2, \Omega}^2}} \quad (69)$$

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A utilização de um modelo numérico, implementado computacionalmente, deve ser precedida de uma etapa de validação, em que os resultados obtidos pelo modelo são comparados com os provenientes de soluções analíticas ou medidas experimentais. Essa análise comparativa é feita com o propósito de garantir que a solução numérica da equação diferencial, que descreve o fenômeno, esteja coerente com o problema físico observado. A etapa de validação deve buscar avaliar a equação diferencial completa. Inicialmente, procura-se validar os resultados para casos mais simples, chegando até os casos mais complexos, em que seja possível a comparação com dados experimentais ou de soluções analíticas.

Os métodos numéricos geram uma equação linear para cada volume da malha. Dessa forma, os coeficientes das equações discretizadas dependem da escala do espaço, dada por métrica qualquer dos volumes da malha; e da escala de tempo, dada pelo passo de tempo Δt . Essas duas escalas interferem diretamente na exatidão dos métodos numéricos. Para garantir que os resultados da simulação sejam independentes do tamanho de malha, necessita-se, também, estudar esses aspectos do método que se resumem, basicamente, no estudo do refinamento de malha e variação no passo de tempo.

7.1. Validação dos modelos propostos

7.1.1. Caso 1: advecção-difusão unidimensional em regime transiente

Modelos de transporte de quantidades escalares e modelos de resfriamento/aquecimento que consideram válida a teoria da mistura (equilíbrio térmico local entre a massa de grãos e o ar) são descritos pela equação 42. Os modelos de resfriamento/aquecimento que não consideram a teoria de mistura são definidos por duas equações de advecção-difusão acopladas por um termo-fonte. Por esse motivo, foi feito um estudo para verificar se o programa Ansys CFX apresentava alguma limitação para resolver equações desse tipo.

7.1.1.1. Estudo numérico do refinamento da malha

A utilização de um método numérico para a solução de um modelo implica utilização de malhas para discretização das equações. Isso faz que ocorram erros de truncamento devido às aproximações utilizadas como funções de interpolação. Os erros de truncamento dependem do espaçamento entre os pontos da malha, sendo maior quanto maior as distâncias entre os pontos dessa malha. Por essa razão, normalmente é feito um estudo de refinamento progressivo de malha, com o objetivo de garantir que os erros de truncamento não tenham forte influência sobre os resultados.

Na Tabela 8 são apresentados os erros entre a solução numérica e a solução analítica (equação 64), em função do nível de refino da malha e da variação do número de Péclet (Pe).

Pela análise da Tabela 8, pode-se afirmar que o programa utilizado é capaz de resolver com exatidão problemas advectivo-difusivos, porém o erro aumenta com o crescimento do número de Péclet. Melhor, é necessário refinar a malha e o passo de tempo para aumentar a precisão do modelo.

Tabela 8 – Erros em função do número de Peclet

Número de Peclet (malha 804 nós)					
Erro	0.1	1	10	100	1.000
Absoluto	1,635 E-08	2,399 E-08	1,750 E-07	1,123 E-05	2,594 E-04
Relativo	2,569 E-04	3,026 E-04	6,193 E-03	5,183 E-03	2,411 E-02
Número de Peclet (malha 2.804 nós)					
Erro	0.1	1	10	100	1.000
Absoluto	2,249 E-09	8,524 E-12	3,843 E-11	1,226 E-07	2,503 E-06
Relativo	1,036 E-04	5,704 E-06	9,175 E-06	5,416 E-04	2,368 E-03
Número de Peclet (malha 44.460 nós)					
Erro	0.1	1	10	100	1.000
Absoluto	1,435 E-08	8,025 E-12	1,947 E-10	2,086 E-08	3,565 E-07
Relativo	2,406 E-04	5,535 E-06	2,065 E-05	2,234 E-04	8,938 E-04

O teste do passo de tempo não precisou ser realizado, pois neste trabalho adotou foi adotado o critério de que o número de Courant (Co), definido pela equação 69, deve ser inferior ou igual a 1 (FERZIGER; PERIĆ, 2002). Desse modo, o passo de tempo é fixado em função do número de Courant, que por sua vez depende do espaçamento entre os pontos da malha e da velocidade do escoamento.

$$Co = \frac{\Delta t}{\Delta x} u \quad (70)$$

em que:

Δt = passo de tempo, s;

Δx = espaçamento entre os pontos da malha, m; e

u = Velocidade, m s⁻¹.

Por meio da Figura 7, apresenta-se uma comparação gráfica entre o resultado da simulação para o caso advectivo-difusivo de uma malha com 804 nós.

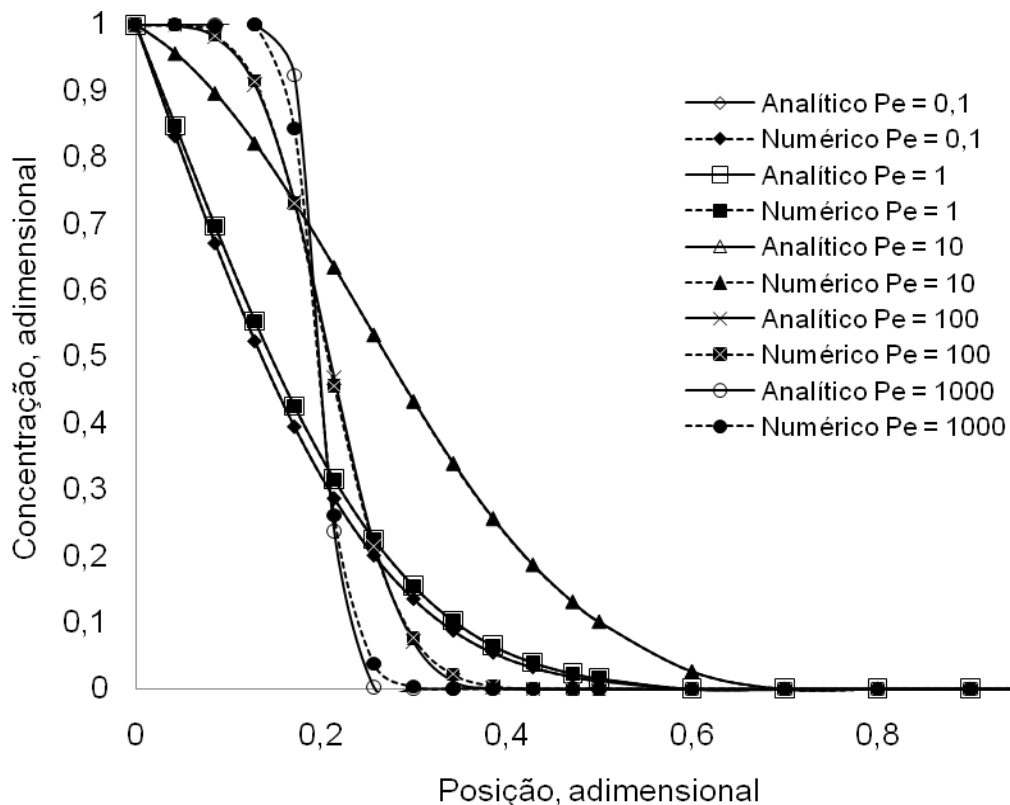


Figura 7 – Concentração adimensional em função da posição adimensional (malha com 804 nós).

A Figura 7 permite visualizar a boa concordância entre os resultados obtidos (discutidos anteriormente na análise da Tabela 8) analítica e numericamente para o problema.

É interessante notar que, quando o número de Peclet é elevado, ocorre um fenômeno nas soluções, conhecido como difusão numérica. Em problemas com altos números de Peclet, o principal mecanismo de transferência (de massa ou de calor) é a advecção. Porém, os modelos numéricos tendem a apresentar uma “falsa” difusão (MALISKA, 2004). Esse fenômeno é mais intenso no esquema UPWIND e menos no esquema CDS (FERZIGER; PERIĆ, 2002). No entanto, o esquema UPWIND é mais estável que o CDS. Quando se optou por usar combinação dos dois esquemas, o objetivo foi mesclar a estabilidade do UPWIND e a precisão do CDS.

A Figura 8 ilustra os resultados da simulação realizada com uma malha mais refinada. Pode-se observar que o refinamento reduziu a difusão numérica, e assim o esquema de advecção escolhido, combinado com o refinamento da malha, se mostrou eficiente e capaz de reduzir o fenômeno da falsa difusão.

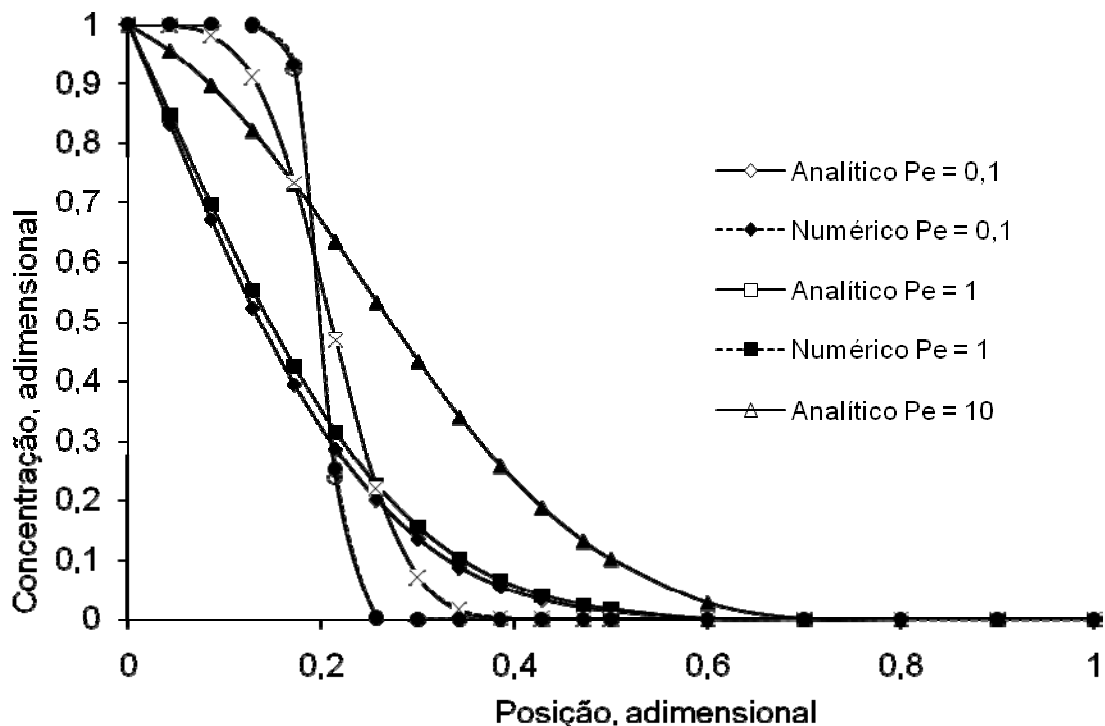


Figura 8 – Concentração adimensional em função da posição adimensional (malha com 2.804 nós).

7.1.2. Caso 2: escoamento tridimensional em regime permanente em um meio poroso sem transferência de calor

O segundo caso simulado refere-se ao escoamento de fluidos através de meios porosos. As diferenças entre as massas específicas em função da pressão, obtida pela equação (14), para o milho e para a soja, são apresentadas na Figura 9.

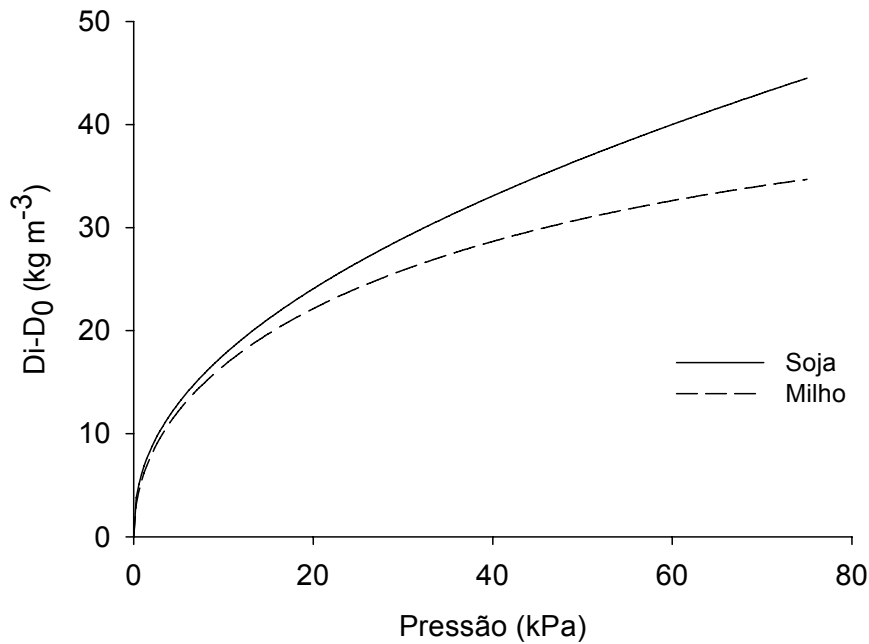


Figura 9 – Variação da massa específica aparente em função da pressão de grãos de milho e soja para um teor de água de 12% (b.u).

Thompson et al. (1987) mostraram que o comportamento da variação da massa específica aparente é similar em muitas variedades de grãos. Entretanto, a variação da massa específica aparente para determinada pressão não é a mesma em todos os produtos, como verificado na Figura 9. Quando as pressões são baixas, o simples rearranjo dos grãos reduz os espaços vazios e, conseqüentemente, a porosidade do meio. Quando as pressões são excessivamente altas, pode haver quebras em alguns grãos, e as partes menores, resultantes dessa quebra, podem reduzir os espaços vazios; assim, a porosidade também seria reduzida (THOMPSON et al., 1987; ROSS et al., 1979).

Os resultados das variações da pressão vertical são mostrados na Figura 10.

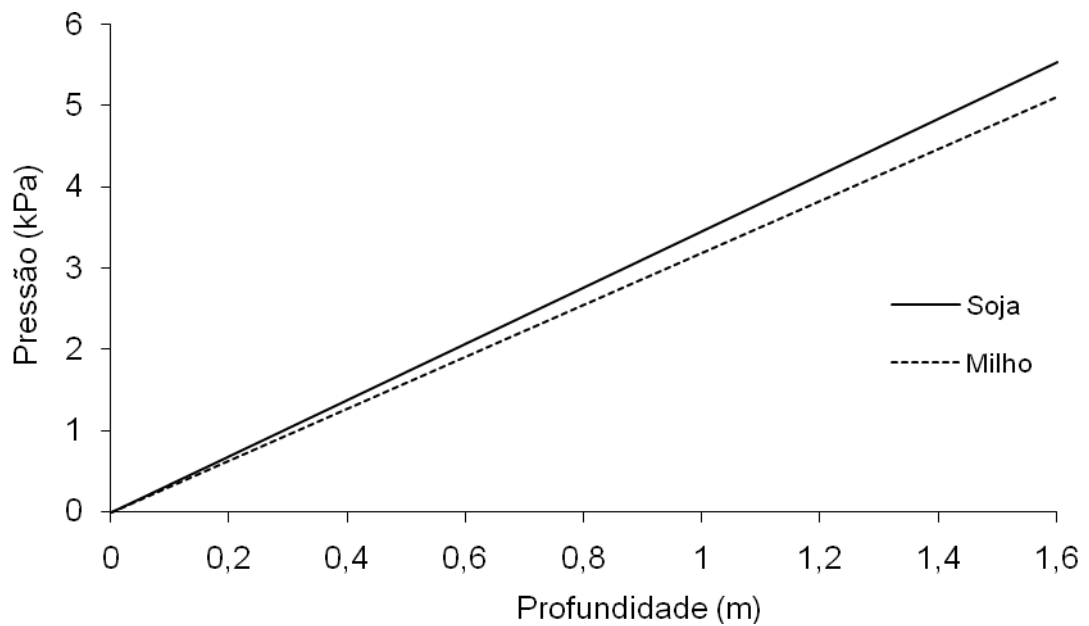


Figura 10 – Variação da pressão exercida pela massa de grãos em relação à altura.

Nota-se, pela Figura 10, que, no intervalo de 0 a 1,6 m de profundidade, a relação entre a pressão e a profundidade é visivelmente linear.

Os perfis de porosidade obtidos pela combinação das equações (18), (20) e (21) para grão de milho e soja são mostrados na Figura 11.

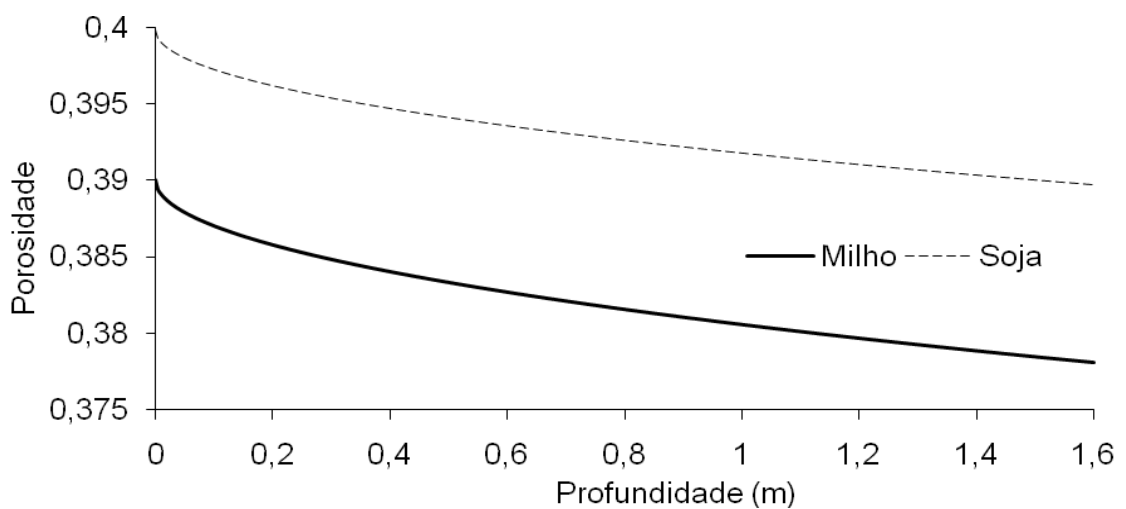


Figura 11 – Perfil de porosidade axial.

A Figura 11 mostra que a porosidade decai exponencialmente com a profundidade. Desse modo, a equação (71) foi ajustada para que se possa prever o valor da porosidade em diferentes espessuras da camada de grãos.

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + ae^{-by}) \quad (71)$$

Os valores de ε_0 e b são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores ajustados de ε_0 e b

Produto	ε_0	a	b
Soja	0,39984	0,02626	1,0240
Milho	0,39003	0,03205	1,0013

O perfil de porosidade radial de uma matriz composta por partículas esféricas (equação 22) e não esféricas (equação 24), próximo da parede do silo, é mostrado na Figura 12.

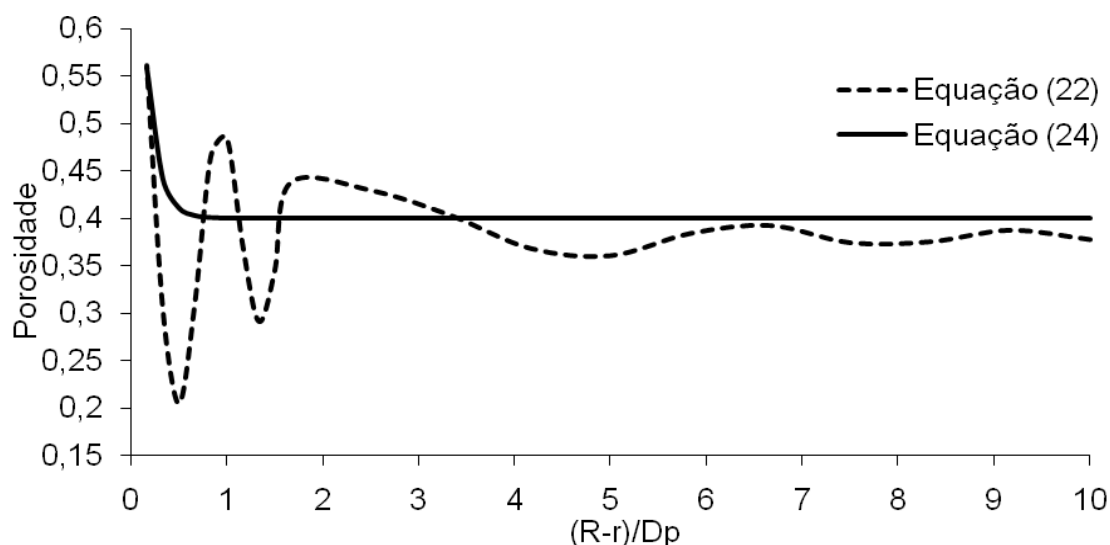


Figura 12 – Perfil de porosidade radial próximo à parede.

Os perfis representados pelas equações (22) e (24) caracterizam a porosidade próxima das paredes dos silos. Analisando esses perfis, é possível perceber que a variação da porosidade radial só é significativa nas regiões muito próximas das paredes do silo, porém esse efeito é demasiado pequeno, sendo significativo apenas em canais cujo diâmetro hidráulico não seja maior que 10 diâmetros de partícula (D_p). Como os silos armazenadores possuem diâmetros hidráulicos muito maiores que $10 D_p$, esse efeito pode ser desprezado. Entretanto, o “efeito-parede” é conhecido por todos aqueles que trabalham diretamente com o armazenamento. Esse fenômeno possivelmente se dá devido à deposição de partículas finas que reduzem a porosidade do meio, tornando-o anisotrópico. Neste trabalho, a hipótese de anisotropia radial causada pelo acúmulo de finos não foi estudada.

Um teste de malha (Figura 13) foi feito com o objetivo de determinar o espaçamento de malha mais eficiente para o problema.

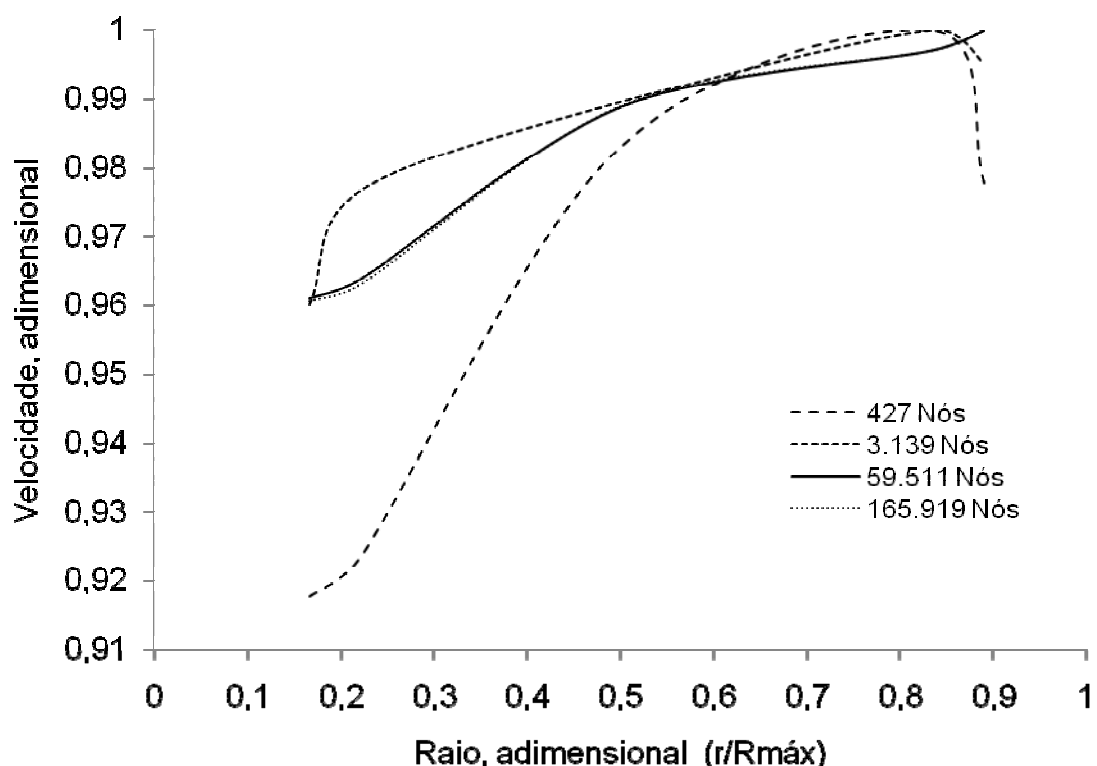


Figura 13 – Teste de malha.

Pela análise da Figura 12, fica evidente que a malha com 59.511 nós é suficiente para simular o escoamento de ar, uma vez que os resultados comparados com uma malha, aproximadamente três vezes mais refinada, não apresentaram diferenças significativas no valor da variável em estudo (velocidade).

A malha usada no estudo (59.511 nós) é mostrada na Figura 14.

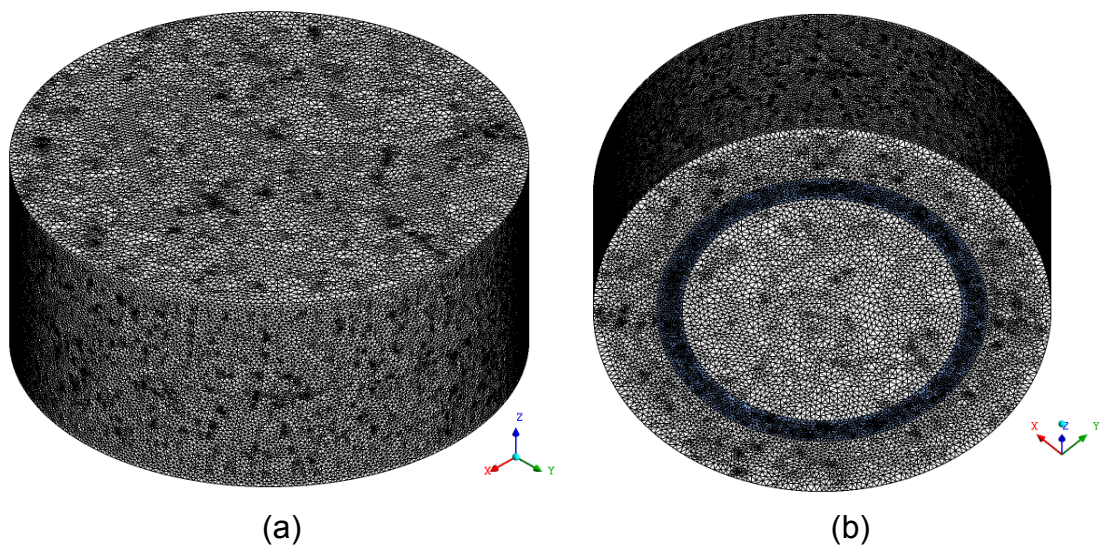


Figura 14 – Malha usada para o caso do escoamento de ar através de uma massa de grãos de milho (a) com destaque para a região de entrada (b).

O perfil de velocidade encontrado experimentalmente é comparado com o simulado na Figura 15.

O erro relativo foi de 6,86%, semelhante ao verificado nos estudos de simulação realizados por Devilla (2005). A divergência entre os resultados simulados e experimentais, principalmente nos dois primeiros pontos, pode ser explicada pelo fato de que o modelo simulado não prediz a variação de porosidade radial devido ao acúmulo de finos. Essa variação de porosidade é, possivelmente, a causa do menor escoamento de ar na região central do silo.

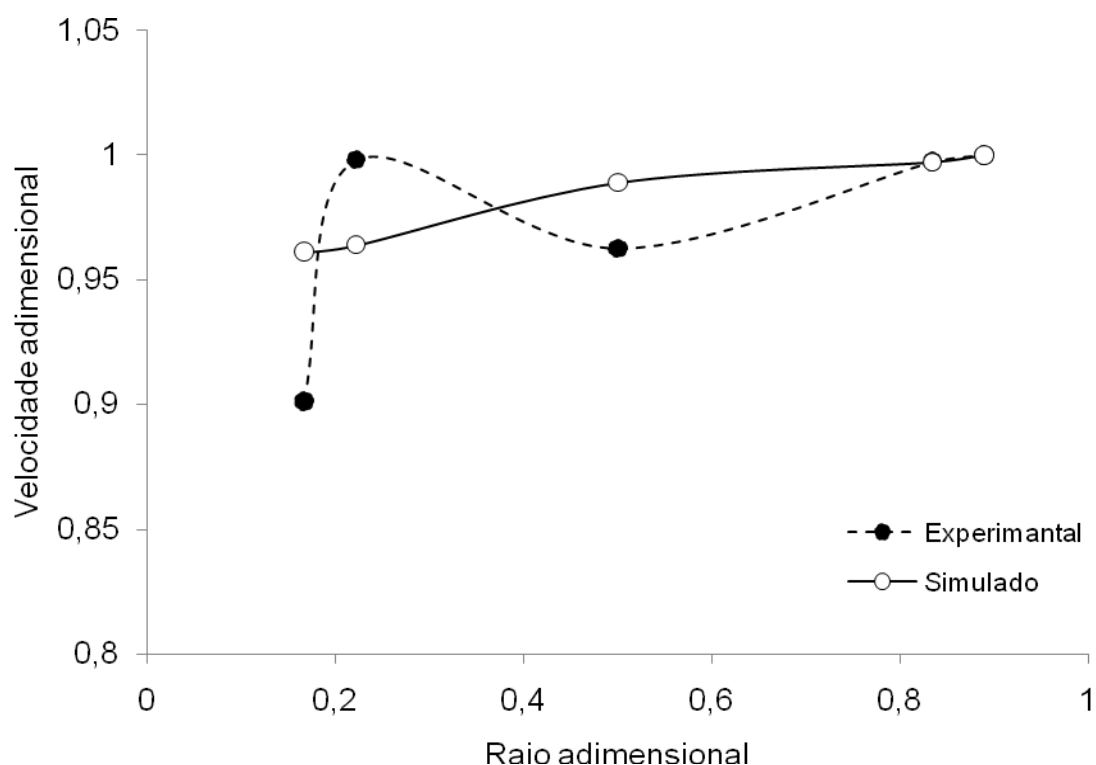


Figura 15 – Comparação entre o perfil de velocidades experimental e simulado.

A Figura 16 ilustra os contornos de pressão. Esses resultados permitem inferir que a pressão e a velocidade são variáveis dependentes, ou seja, regiões de menor pressão são também regiões onde se observam menores velocidades de escoamento. Desse modo, a análise da Figura 14 mostra que a região central do silo possui velocidades menores. Esse resultado é confirmado pela observação dos vetores de velocidade (Figura 17).

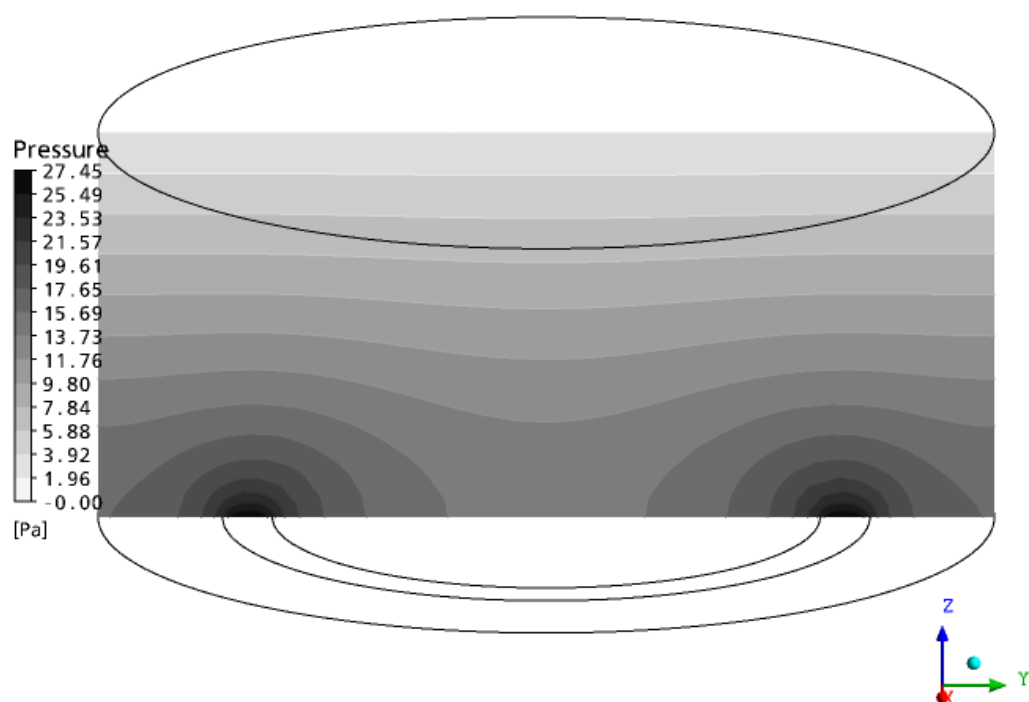


Figura 16 – Contornos de pressão.

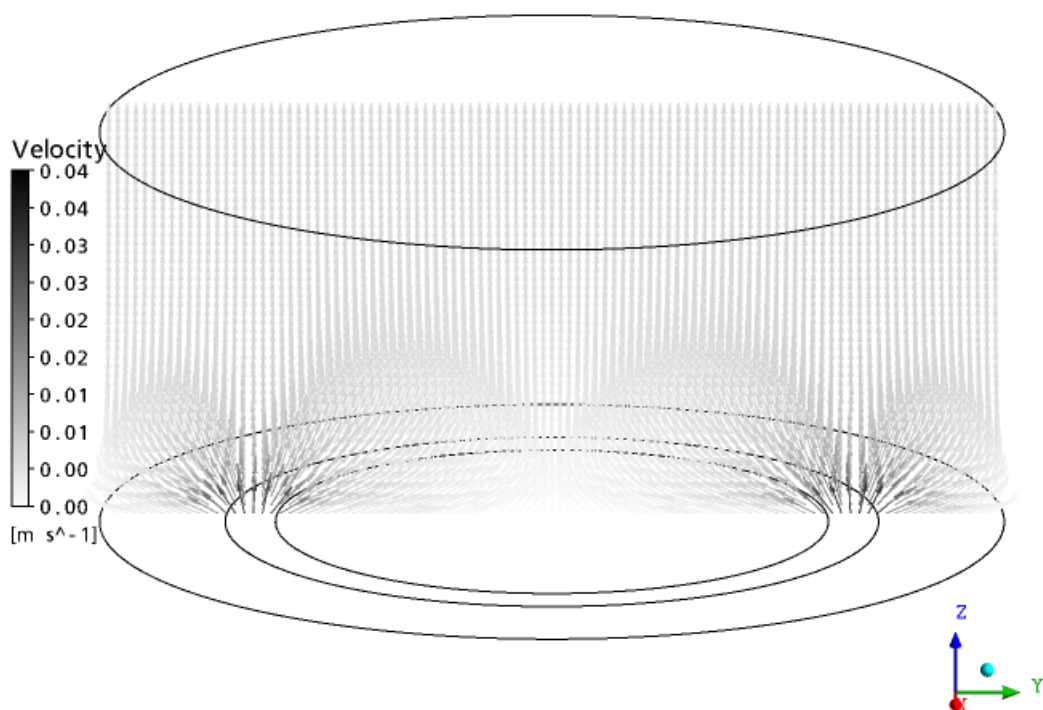


Figura 17 – Distribuição de velocidades no interior do silo.

Para que a aeração seja feita com sucesso, é importante que o escoamento seja uniforme, ou seja, os campos de velocidade devem ser uniformes na maior parte da massa de grãos. A Figura 18 contém a análise do perfil de velocidades de escoamento no sistema estudado. Observa-se, nessa figura, que as velocidades tendem a ser uniformes somente a partir de 1 m de espessura de camada ($z^* = 0.625$). Observa-se, ainda, que as velocidades na parte central do interior do silo são muito baixas. Uma análise da equação (41) permitiu inferir que o resfriamento nessa região será mais demorado, uma vez que o fenômeno de troca de calor pode vir a ser governado, principalmente, pelo fenômeno de difusão, que é bem mais lento que o processo convectivo. Além disso, nas áreas onde a velocidade é muito elevada pode ocorrer a supersecagem dos grãos.

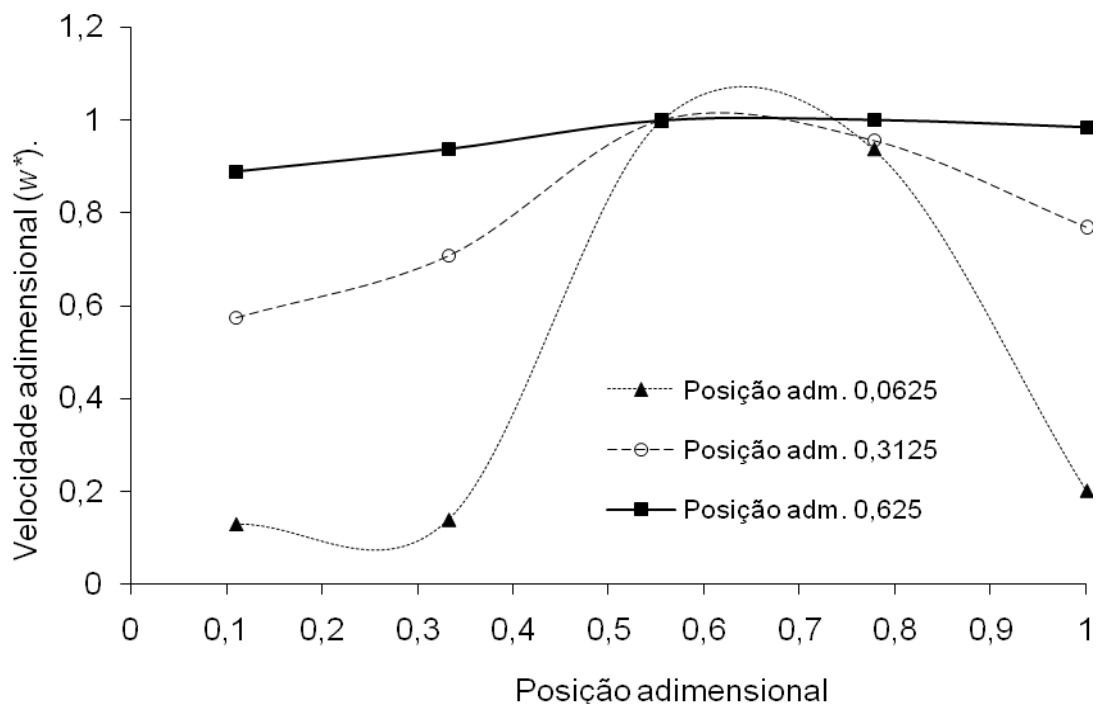


Figura 18 – Perfis adimensionais de velocidades em três diferentes posições.

7.1.3. Modelo acoplado de transferência de calor

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente medidos no dia do teste de resfriamento estão mostrados na Figura 19.

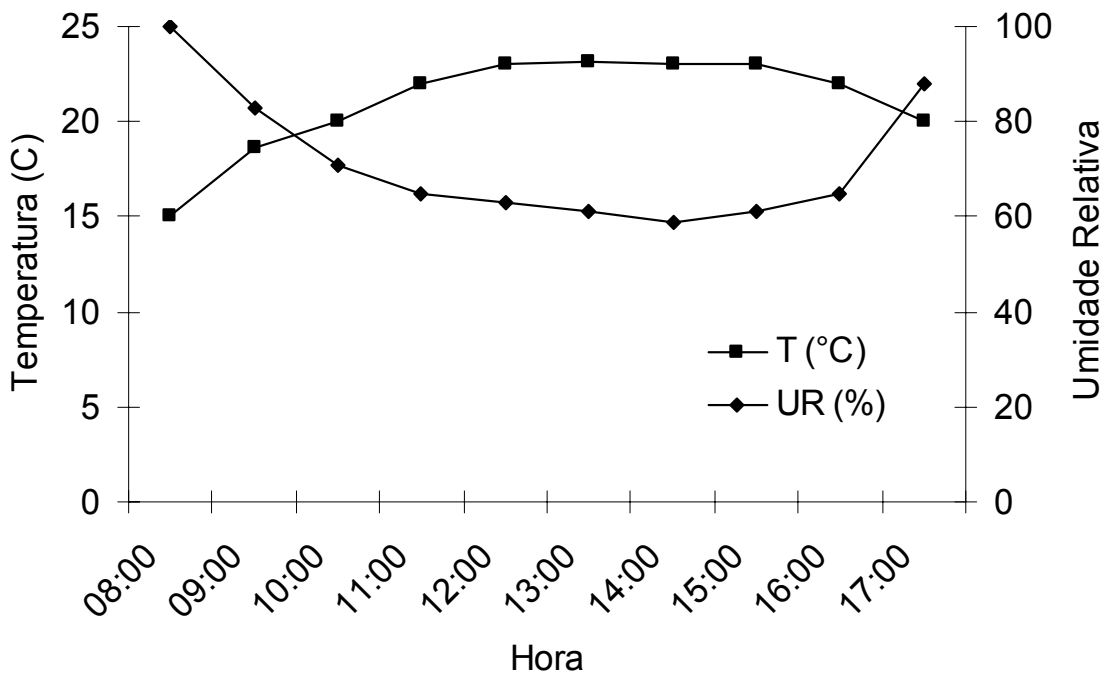


Figura 19 – Variação da temperatura e umidade relativa no dia 05/05/2009.

A temperatura do ar de resfriamento variou durante o dia, sendo essa variação mostrada na Figura 20.

A temperatura média foi usada como condição de contorno na entrada para a simulação. A umidade relativa do ar na entrada variou entre 65 e 75%. Portanto, a umidade relativa média (70%) foi considerada na simulação. A variação da temperatura dos grãos durante o resfriamento, medida experimentalmente, é mostrada na Figura 21, em que se observa que as temperaturas não se encontravam homogêneas no tempo inicial (8 h). Aparentemente, havia um gradiente de temperatura no qual a temperatura do ponto mais profundo era maior que a do ponto intermediário, que por sua vez era maior que a do ponto superior da massa de grãos. Essas temperaturas foram usadas como condição inicial.

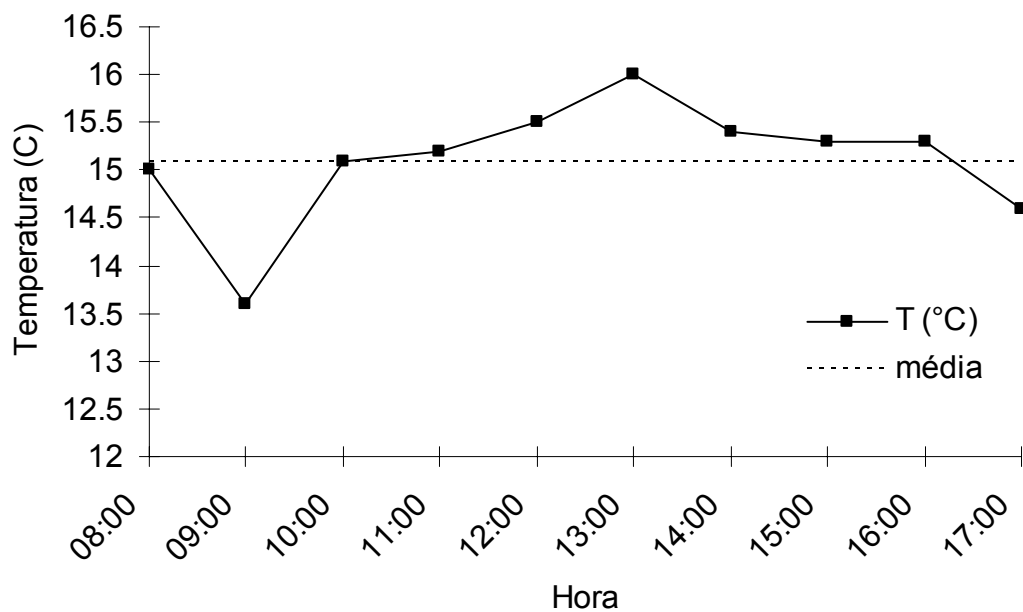


Figura 20 – Variação da temperatura de resfriamento.

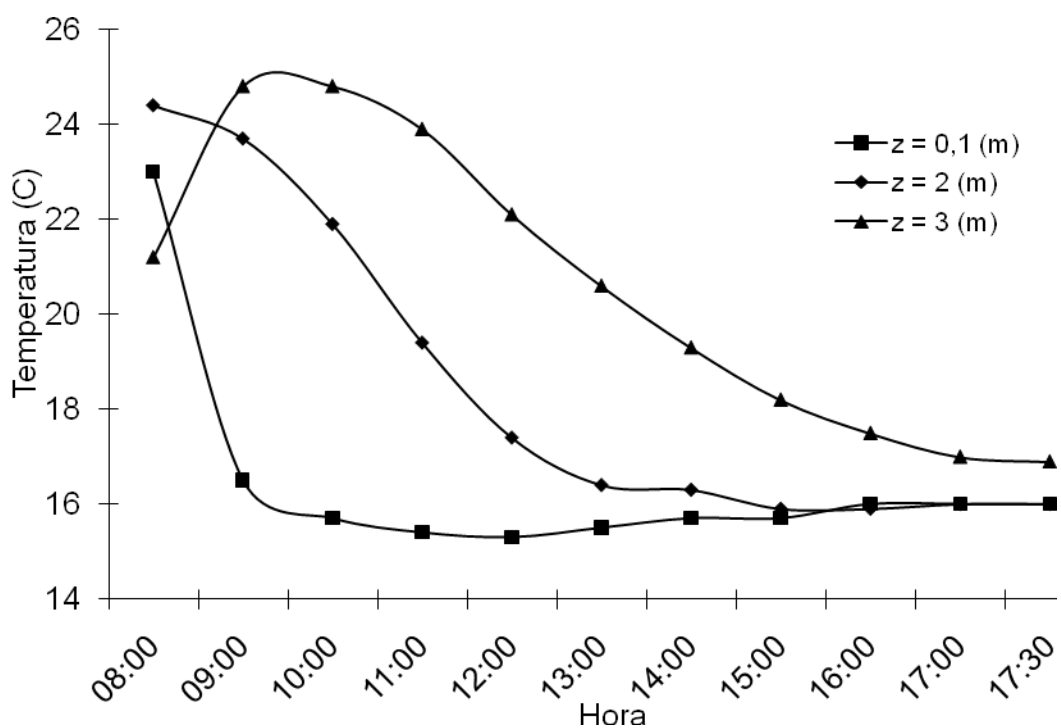


Figura 21 – Perfis de temperatura durante o resfriamento.

A temperatura no ponto localizado a 3 m encontrava-se mais baixa que as demais. Por esse motivo, inicialmente houve aquecimento desse ponto.

A simulação foi feita usando-se uma malha unidimensional. A escolha da malha com essa configuração é baseada nas configurações simétricas do silo e na uniformidade do escoamento.

Na Figura 22, apresenta-se o teste de malhas utilizadas para o estudo do resfriamento de grãos de soja. Neste estudo, comparou-se a influência da variação da temperatura adimensional (em $z^* = 0,0333$) ao longo do tempo adimensional.

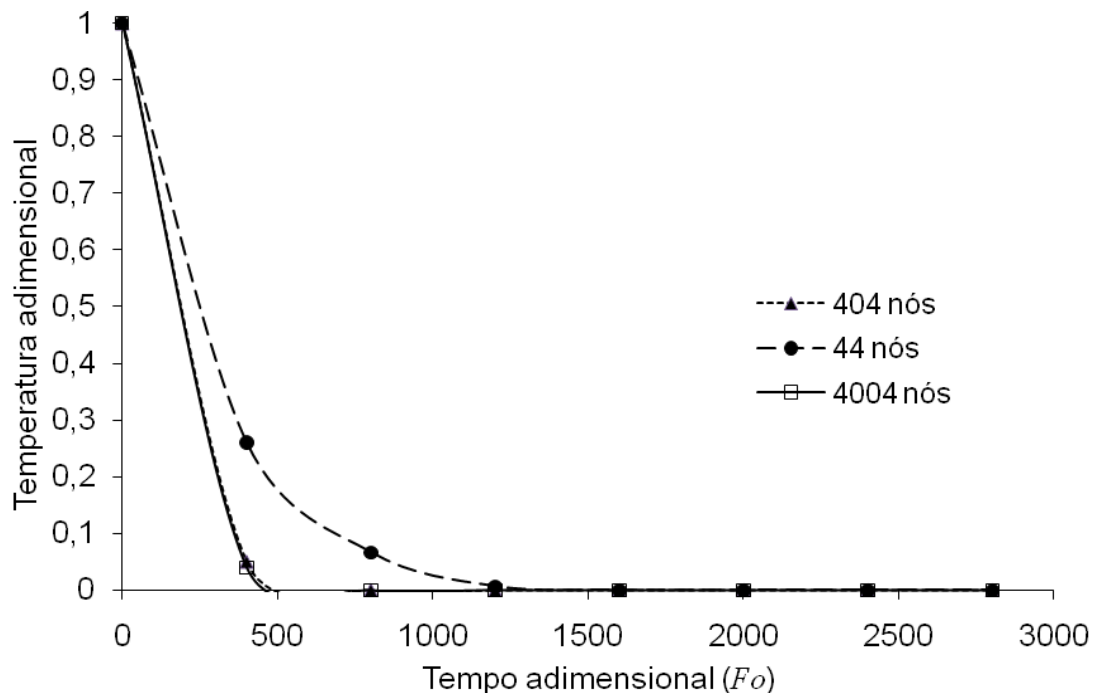


Figura 22 – Teste de malha para o problema acoplado de transferência de calor.

Percebe-se que a malha pouco refinada apresentou resultados que estão fortemente influenciados pelos erros de truncamento e que, para uma malha de 404 nós, os resultados já são muito próximos da solução de referência (4.004 nós).

A malha com 404 nós é, portanto, suficientemente refinada para a simulação do resfriamento, pois uma malha 10 vezes mais refinada não apresentou diferenças significativas nos resultados.

As condições de contorno e iniciais usadas na simulação são baseadas nas condições do resfriamento descritas anteriormente. Todos os outros parâmetros do modelo foram apresentados no Quadro 1.

Na Figura 23, mostram-se as distribuições de temperatura experimentais e obtidas pela simulação em diferentes pontos da massa de grãos.

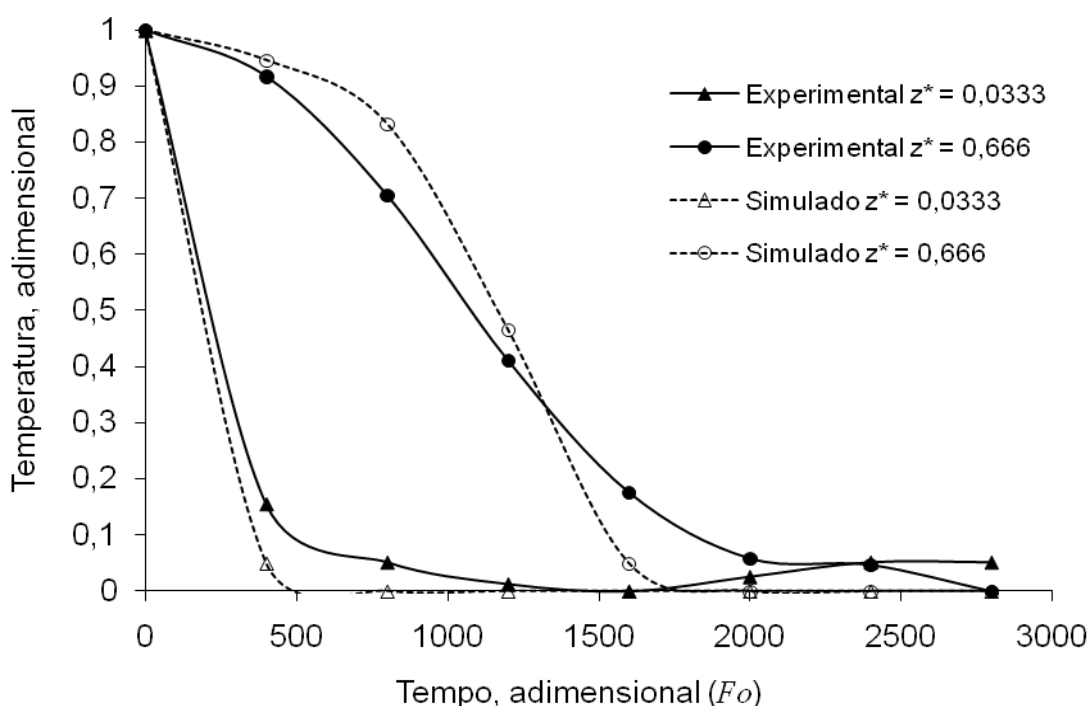


Figura 23 – Comparação entre os resultados experimentais e simulados.

Os valores simulados e experimentais possuem concordância satisfatória, com erro absoluto de 3,76% e 5,55% para os pontos 0,333 e 0,666, respectivamente, erro relativo de 6% e 5,5%, nos mesmos pontos. A diferença entre eles pode ser explicada por diversos fatores. Entre eles, o fato de se considerar a temperatura do ar de resfriamento constante é,

possivelmente, o que causa maior divergência entre os resultados. Leva-se em consideração, ainda, o fato de que o fluxo de ar também variou durante o experimento e o valor usado na simulação é a média dos valores experimentais.

A Figura 24 ilustra a dinâmica do resfriamento dos grãos de soja nos pontos 0,1; 0,5; 1; 1,5; e 2 (valores simulados).

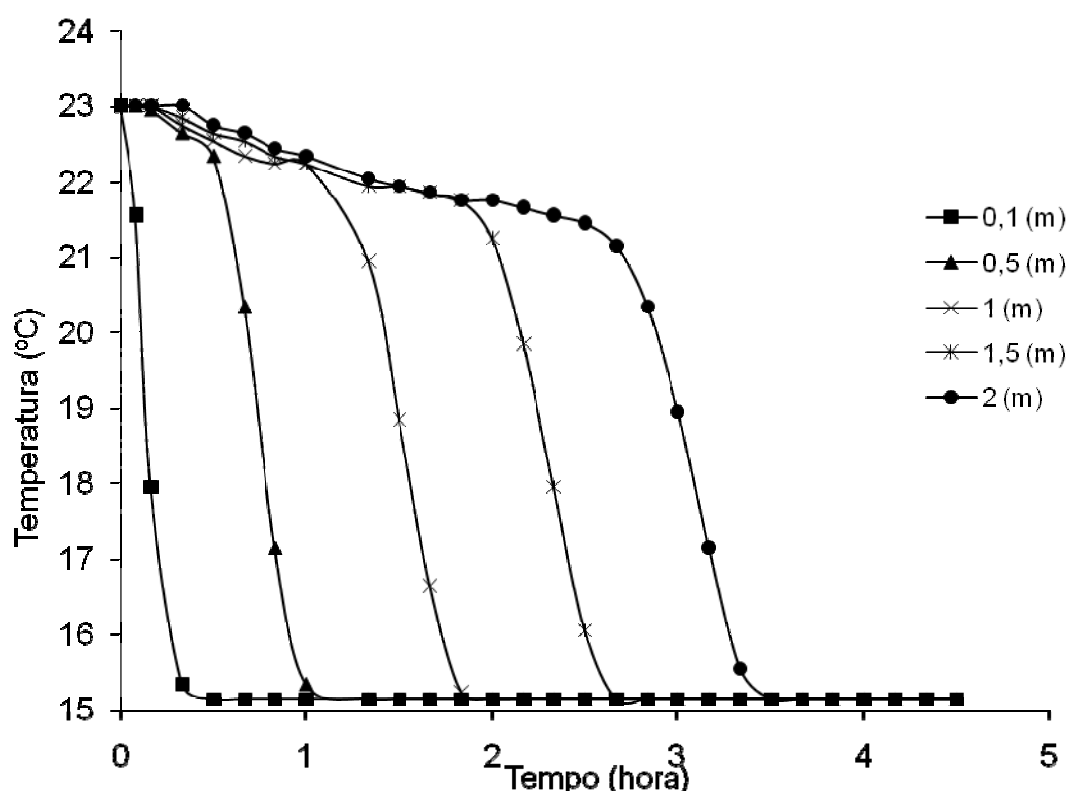


Figura 24 – Perfis de simulados de temperatura em vários pontos da massa de grãos.

Por meio da Figura 24, observa-se que a taxa de resfriamento varia abruptamente durante o processo em todos os pontos. Os pontos localizados próximos da entrada do ar frio são resfriados rapidamente. Entretanto, o resfriamento dos pontos localizados em distâncias maiores apresenta três momentos distintos.

Primeiramente, observou-se resfriamento lento. Isso pode ter ocorrido pelo fato de a massa de grãos ter baixa difusividade térmica, ou seja, sua

capacidade de armazenar calor é muito superior à sua capacidade de transferi-lo. Desse modo, quando o ar passa pelas primeiras camadas, grande parte do calor é absorvida pelos grãos dessas camadas iniciais, reduzindo, assim, a capacidade de resfriamento do ar. O segundo momento ocorre quando as camadas de grãos anteriores já foram resfriadas, ou seja, quando a frente de resfriamento chega à camada subsequente. Nesse momento, a taxa de resfriamento aumenta abruptamente, e o resfriamento ocorre muito rapidamente. No último momento, o resfriamento torna-se novamente lento, e a temperatura dos grãos tende à temperatura de resfriamento assintoticamente. Esse fenômeno ocorre porque a principal força-motriz do resfriamento é a diferença de temperatura entre a fase sólida e fluida. Quando essa diferença é pequena, a taxa de resfriamento também se torna pequena, pois elas são proporcionais.

Conclui-se que o modelo de resfriamento simulado é válido e permite a simulação do resfriamento de grãos em leito fixo.

8. CONCLUSÕES

Um modelo computacional de CFD foi apresentado neste estudo para simular o escoamento de ar através de meios porosos, durante o resfriamento de grãos de soja. As simulações foram realizadas, e os dados foram comparados com soluções analíticas e valores experimentais.

Com base nos resultados, concluiu-se que:

- O modelo genérico, puramente advectivo-difusivo, sem geração ou termo-fonte/sumidouro apresentou bom ajuste quando comparado com os valores encontrados usando-se solução analítica e mostrando que o programa computacional usado não possui limitações que impeçam a solução de equações desse tipo.
- O modelo, em CFD, do escoamento de ar em leito fixo poroso em que se considerou a variação da porosidade axial pode ser usado para estudar sistemas que envolvam escoamento de fluidos através de grãos, em leito fixo.
- Com base nos resultados simulados, o sistema de aeração, utilizado comparativamente, não foi satisfatório.
- O modelo de resfriamento foi validado com dados experimentais e considerado satisfatório.
- Os modelos propostos são coerentes e podem ser utilizados em outros estudos de sistemas de resfriamento ou secagem de grãos.
- A CFD mostrou ser excelente ferramenta de auxílio em projetos de sistemas de resfriamento e secagem de grãos.

9. REFERÊNCIAS

ABBA, E. J.; LOVATO, A. Effect of seed storage temperature and relative humidity on maize (*Zea mays* L.) seed viability and vigour. **Seed Science and Technology**, v. 27, p. 101-114, 1999.

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

ALAM, A.; SHOVE, G. C. Hygroscopicity and thermal properties of soybean. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 4, p. 707-709, 1973.

ARAÚJO, J. M. A. Química de alimentos: teoria e prática. Viçosa, MG: Editora UFV, 2004. 416 p.

ASSIS, A. J.; LIRA, T. S.; MURATA, V. V.; BARROSO, A. S. concurrent drying of soybean seeds: the effect of radial air profile. **Drying**, São Paulo, Brasil, v. A, p. 640-647, 2004.

BEAR, J. **Hydraulics of groundwater**. New York: McGraw-Hill, 1979. 569 p.

BENENATI, R. F.; BROSILOW, C. B. Void fraction distribution in beds of spheres. **AIChE Journal**, v. 8, p. 359-361, 1962.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450 p.

CELARO, J. C.; FINAMOR, O. R.; FRANCO, J. B. R. Quebra técnica de grãos armazenados a meio ambiente. In: SERAPHIM, L. S. B. H. **Qualidade e quebra técnica de milho armazenado em diferentes ambientes**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2006.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia**. São Paulo: McGrall-Hill, 2008. 809 p.

CHRISTENSEN, C. M.; KAUFMANN, H. H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C.M. **Storage of cereal grains and their products**. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1975. p.158-192.

CLARK, P.K.; SNYDER, H. E. Hidroperoxide formation in soybean seeds during storage. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 68, n. 5, p. 346-347, 1991.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira 2007/2008** – Décimo Segundo Levantamento. Brasília, set. 2008. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2009.

DEVILLA, I. A.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M. Distribuição do fluxo de ar em silos com sistema de aeração: análise por elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 256-262, 2005.

DHINGRA, O. D.; MIZUBUTI, E. S. G.; NAPOLEÃO, I. T.; JHAM, G. Free fatty acid accumulation and quality loss of stored soybean seeds invaded by *Aspergillus flavus*. **Seed Science and Technology**, v. 29, p. 193-203, 2001.

DRYEARATION. **Influência do controle de qualidade na armazenagem de grãos, na redução do custo de refino de óleo de soja**. Domínio operacional. [S.l. : s.n.], 2000. p 84-98.

ERGUN, S. Flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, n. 2, p. 89-94, 1952.

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.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational methods for fluid dynamics**. New York: Springer, 2002. 423 p.

FORTES, M. Second-law modeling of deep drying process with a simulation study of wheat air-recirculated fluidized-bed drying. **Drying**, São Paulo, Brasil, v. A, p. 18-32, 2004.

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.

HERBIN, R. An error estimate for a finite volume scheme for a diffusion-convection problem on a triangular mesh. **Numerical Methods in Partial Differential Equations**, v. 11, p. 165-173, 1995.

HUKILL, W. V.; IVES, N. C. Radial air flow resistance of grains. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 36, n. 5, p. 332-335, 1955.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. [S.l.]: LTC, 2003.

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.

KAVIANY, M. **Principles of heat transfer in porous media**. New York: Springer-Verlag, 1995. 624 p.

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.

LACERDA, A. D. S.; LAZARINI, E.; SÁ, M. E.; FILHO, W. V. V. Armazenamento de sementes de soja dessecadas e avaliação da qualidade fisiológica, bioquímica e sanitária. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 25, n. 2, p. 97-105, 2003.

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.

LI, W.; SOKHANSASANJ, S. Generalized equation for airflow resistance of bulk grains with variable density, moisture content and fines. **Drying Tech**, v. 12, n. 13, p. 649-667, 1994.

LIU, K. Soybean oil extraction and processing. In: LIU, K. **Soybeans chemistry, technology, and utilization**. New York: ITP, 1997a. p. 297-346.

LIU, S.; MASLIYAH, J. H. Dispersion in porous media. In: ——. **Handbook of porous media**. New York: CRC Press, 2005. p. 115.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. São Paulo: LTC, 2004. 453 p.

MARTINS, M. A.; OLIVEIRA, L. S.; VALLE, R. M. Adaptivity for finite volume on unstructured triangular meshes: A study of thermal injury in teeth. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 61, n. 10, p. 1625-1643, 2004.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 192 p.

MAYER, D. E.; NAVARRO, S. Chilling of grain by refrigerated air. In: NAVARRO, S.; NOYES, R. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. New York: CRC Press, 2002. p. 489-560.

MOLEND, M.; MONTROSS, M. D.; MCNEILL, A. G.; HORABIK, J. Airflow resistance of seeds at different bulk densities using Ergun's equation. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 48, n. 3, p. 1137-1145, 2005.

NAVARRO, S.; NOYES, R. T. (Eds.). **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. New York: CRC Press, 2002. 647 p.

NEGRINI, A. L.; FUELBER, A.; FREIRE, J. T. Fluid dynamics of air in a packed bed: velocity profiles and the continuum model assumption. **Brazilian J. Chem. Eng.**, v. 16, n. 4, p. 421-432, 1999.

NIEL, D. A.; BENJAN, A. Convection in porous media. New York: Springer, 2006. 653 p.

OLIVEIRA, J. T. G. S. B. **Melhor dose e dose econômica de tbhq nos óleos de milho e canola**. 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2003.

ORTHOEFER, F. T. Processing and utilization. In: NORMAN, A. G. (Ed.). **Soybean physiology, agronomy and utilization**. New York, 1978. p. 219-246.

PADIN, S.; BELLO, G. D.; FABRIZIO, M. Grain loss caused by *Tribolium castaneum*, *Sitophilus oryzae* and *Acanthoscelides obtectus* in stored durum wheat and beans treated with *Beauveria bassiana*. **Journal of Stored Products Research**, v. 38, p. 69-74, 2002.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.

RAVENET, J. **Silos: teoría, investigación, construcción**. Barcelona: Editores Tecnicos Asociados S.A., 1977. 381 p.

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).

ROSS, I. J.; BRIDGES, T. C.; LOEWER, O. J.; WALKER, J. N. Grain bin loads as affected by grain moisture content and vertical pressure. **Transactions of ASAE**, St Joseph, v. 22, n. 3, p. 592-597, 1979.

SAUER, D. B. **Storage of cereal grains and their products**. Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, 1992. 614 p.

SHEDD, C. K. Some new data on resistance of grains to air flow. **Journal Agricultural Engineering**, v. 32, n. 9, p. 493-495; 520, 1951.

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.

SUN, D. W.; BYRNE, C. Selection of EMC/ERH isotherm equations for rapeseed. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, n. 69, p. 307-315, 1998.

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.

THOMPSON, S. A.; MCNEILL, S. G.; ROSS, I. J.; BRIDGES, T. C. Packing factors of whole grains in storage structures. **Applied. Eng. In. Agric.**, v. 3, n. 2, p. 215-221, 1987.

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.