

KELLER SULLIVAN OLIVEIRA ROCHA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE
GRÃOS ARMAZENADOS EM SILOS GRANELEIROS POR MEIO DAS LEIS
DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E MASSA**

**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
2012**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R672m
2012

Rocha, Keller Sullivan Oliveira, 1979-

Modelagem e simulação do processo de resfriamento de grãos armazenados em silos graneleiros por meio das leis de conservação de energia e massa / Keller Sullivan Oliveira Rocha. – Viçosa, MG, 2012.

xxv, 150f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos e apêndices.

Orientador: José Helvecio Martins.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Grãos - Armazenamento. 2. Grãos - Conservação. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. Navier-Stokes, Equações de. 5. ANSYS (Programa de computador). 6. Volumes finitos - Modelos matemáticos. 7. Calor - Transmissão. 8. Massa - Transmissão. 9. Sistemas de computação. 10. Controle de processo. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 633.10468

KELLER SULLIVAN OLIVEIRA ROCHA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE
GRÃOS ARMAZENADOS EM SILOS GRANELEIROS POR MEIO DAS LEIS
DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E MASSA**

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: 27 de fevereiro de 2012.



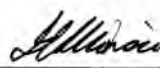
Paulo Marcos de Barros Monteiro



Jadir Nogueira da Silva



Antonio Maria Claret de Gouveia



Ilda de Fátima Ferreira Tinôco



**José Helvecio Martins
(Orientador)**

“... a mente que se abre a uma nova idéia...
... jamais voltará ao seu tamanho original...”

Albert Einstein

“...It has been said that something as small as the flutter of a butterfly's wing can ultimately cause a typhoon halfway around the world...”

“...O bater de asas de uma simples borboleta poderia influenciar o curso natural das coisas e, assim, talvez provocar um tufão do outro lado do mundo...”

Edward Norton Lorenz

Chaos Theory - “The Butterfly Effect”

Dedico.

Aos meus pais Geraldo Rocha e Maria Odezi de Oliveira Rocha,
aos meus irmãos Kelly Cristina e Kelvin
e à minha namorada Damiana,
com Amor e Gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, saúde, sabedoria e presença constante em minha caminhada.

Aos meus Pais, Geraldo Rocha e Maria Odezi de Oliveira Rocha, e aos meus irmãos, Kelly Cristina Oliveira Rocha e Kelvin Oliveira Rocha, pelas lições de vida.

Ao Márcio Carneiro Rocha e Sibelle Cristina Barcelos Rocha por toda ajuda e confiança.

À Damiana Diniz Rosa pelo amor, carinho e paciência em todos os momentos.

À Fabiana Rodrigues Mateus pela nossa grande amizade e carinho.

Ao Prof. José Helvecio Martins, pela orientação, amizade, confiança e apoio constante nesta importante etapa da minha formação.

Ao Prof. Adílio Flauzino de Lacerda Filho e ao Prof. Marcio Arêdes Martins, pela co-orientação e apoio indispensável para a realização deste trabalho.

Aos Professores Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, Lêda Rita D'Antonino Faroni, Mauri Fortes, Marcos Teixeira Godinho, Brian Lynn Steward e Paulo Marcos de Barros Monteiro, pelo grande apoio na minha caminhada acadêmica, confiança, amizade e pelos valiosos ensinamentos e apoio constantes.

À Universidade Federal de Viçosa e, em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela oportunidade de realização do curso e concessão da bolsa de estudo.

À equipe da Área de Energia na Agricultura, ao Núcleo de Pesquisa em Ambiente e Engenharia de Sistemas Agroindustriais (AMBIAGRO) e toda a sua equipe, professores e funcionários.

Aos meus amigos e colegas pelo companheirismo, amizade, idéias e incentivo.

Ao amigo Jairo Alexander pelo apoio e companheirismo.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, auxiliaram na execução deste trabalho.

BIOGRAFIA

Keller Sullivan Oliveira Rocha, filho de Geraldo Rocha e Maria Odezi de Oliveira Rocha, nasceu em Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, em 10 de Janeiro de 1979.

Em Março de 2002, iniciou o curso de Sistemas de Informação no Centro Universitário UNA, graduando-se em 2005.

Em Março de 2006, ingressou no programa de Pós-Graduação em nível de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Área de Concentração em Energia na Agricultura, submetendo-se à defesa de dissertação, requisito indispensável para obtenção do título de *Magister Scientiae*, em fevereiro de 2008. Em março do mesmo ano, iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na Área de Energia na Agricultura, defendendo a tese em fevereiro de 2012.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xx
RESUMO.....	xxiv
ABSTRACT.....	xxv
INTRODUÇÃO	1
REFERÊNCIAS.....	5

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....	6
1-1. Propriedades Físicas na Aeração	6
1-2. Propriedades Físicas, Químicas e Biológicas de Grãos	12
1-2.1. Propriedades Físicas e Biológicas dos grãos.....	13
1-2.1.1. Cobertura Protetora (tegumento)	14
1-2.1.2. Eixo Embrionário	14
1-2.1.3. Tecidos Reservas	15
1-2.2. Propriedades químicas dos grãos.....	15
1-3. Propriedades termodinâmicas do ar.....	17
1-3.1. Definição das relações do ar com o vapor de água	19
1-3.2. Propriedades termodinâmicas do ar úmido.....	20
1-4. Conceitos de Fenômenos de Transporte	24
1-4.1. Meio contínuo (para fluidos e meios porosos).....	24
1-4.2. Transporte em estado permanente ou estacionário	25
1-4.3. Transporte em estado transiente ou não estacionário.....	25

1-4.4.	Transporte difusivo	26
1-4.5.	Transporte convectivo.....	28
1-4.6.	Lei de Fourier.....	31
1-4.7.	Primeira Lei de Fick.....	32
1-4.8.	Segunda Lei de Fick	32
1-4.9.	Escoamento incompressível	33
1-4.10.	Escoamento não viscoso	34
1-4.11.	Escoamento irrotacional	34
1-4.12.	Lei de Darcy.....	35
1-4.13.	Porosidade	37
1-4.14.	Permeabilidade.....	38
1-4.15.	Tortuosidade.....	38
1-4.16.	Aproximação de Boussinesq.....	39
1-5.	REFERÊNCIAS	42

CAPÍTULO 2

MODELAGEM MATEMÁTICA	45
2-1. INTRODUÇÃO.....	45
2-1.1. Equações para o fluxo de ar	46
2-1.2. Equações para transferência de calor e massa	48
2-1.3. Equações para taxa de secagem.....	50
2-1.4. Propriedades físicas de grãos de milho	50
2-2. MODELOS COMPUTACIONAIS E APLICAÇÕES UTILIZANDO A MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	52
2-2.1. Equações de Conservação	53
2-2.1.1. Conservação da Massa	53
2-2.1.2. Conservação da quantidade de movimento	53

2-2.1.3.	Conservação da quantidade de energia.....	54
2-2.2.	Métodos numéricos para solução de equações diferenciais	54
2-2.2.1.	Métodos das diferenças finitas.....	55
2-2.2.2.	Método do volume de controle (método dos volumes finitos).57	
2-2.2.3.	Método de diferenças finitas compacto de quarta-ordem.....	58
2-3.	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	58
2-3.1.	Pré-processamento.....	59
2-3.2.	Processamento.....	59
2-3.3.	Pós-processamento	60
2-3.4.	CFD e ANSYS	60
2-3.5.	Programação em ANSYS	61
2-4.	ANÁLISE DIMENSIONAL	63
2-4.1.	Teorema- Π de Buckingham	64
2-4.2.	Grupos- Π	65
2-4.3.	Seleção das Variáveis	66
2-4.4.	Análise de sensibilidade dos problemas de convecção-difusão com termo fonte.....	67
2-5.	INSTRUMENTAÇÃO	68
2-5.1.	Dispositivos digitais endereçáveis da série 1-Wire [®]	68
2-6.	REFERÊNCIAS	74

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA.....	78	
3-1.	Implementação do modelo computacional de convecção-difusão em meios porosos.....	78
3-2.	Geometria e geração da malha	80
3-3.	Simulação do processo de resfriamento de uma massa de grãos... 81	

3-4.	Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo para o caso de resfriamento de uma massa de grãos de milho.....	81
3-5.	Avaliação dos efeitos no processo de resfriamento	82
3-6.	Desenvolvimento do protótipo e validação do modelo computacional.....	82
3-6.1.	Construção do protótipo.....	83
3-6.2.	Instrumentação e aquisição de dados experimentais.....	88
3-7.	REFERÊNCIAS	91

CAPÍTULO 4

	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA RESPOSTA EM REGIME TRANSIENTE DE SENSORES DE TEMPERATURA E DE UMIDADE RELATIVA COM E SEM INVÓLUCRO DE PROTEÇÃO.....	93
	RESUMO.....	93
	SUMMARY	94
4-1.	INTRODUÇÃO.....	95
4-2.	METODOLOGIA	95
4-2.1.	Condições operacionais.....	96
4-2.2.	Aquisição dos dados experimentais.....	98
4-2.3.	Modelo computacional	98
4-2.4.	Condições de contorno	98
4-2.5.	Validação do modelo computacional.....	101
4-3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
4-4.	CONCLUSÕES.....	104
4-5.	AGRADECIMENTOS.....	105
4-6.	REFERÊNCIAS	106

CAPÍTULO 5

MODELAGEM E SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM MEIOS POROSOS: UMA APLICAÇÃO PARA MILHO ARMAZENADO EM SILOS GRANELEIROS... 108

RESUMO.....	108
SUMMARY	109
5-1. INTRODUÇÃO.....	110
5-2. METODOLOGIA	113
5-2.1. Considerações gerais	113
5-2.2. Condições operacionais.....	113
5-2.3. Aquisição de dados experimentais.....	115
5-2.4. Modelagem computacional	115
5-2.5. Condições de contorno	116
5-2.6. Validação do modelo	120
5-3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	121
5-4. CONCLUSÕES	126
5-5. AGRADECIMENTOS.....	127
5-6. REFERÊNCIAS	128

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO DOS GRUPOS DE Π DE BUCKINGHAM	131
A-1. Determinação dos grupos Π	131
A-2. Grupos adimensionais encontrados	135
A-2.1. Número de Reynolds	135
A-2.2. Número Froude.....	136
A-2.3. Número de Eckert.....	136
A-2.4. Número de Nusselt	136

A-2.5. Número de Biot.....	137
A-2.6. Número de Prandtl.....	137
A-2.7. Número Peclet.....	137
A-2.8. Número de Grashof	137
A-2.9. Número Rayleigh	138
A-3. Cálculos dos coeficientes de transferência de calor para o protótipo do silo graneleiro.....	138

APÊNDICE B

CÁLCULO PARA O DIÂMETRO HIDRÁULICO DO SILO GRANELEIRO ...	140
--	------------

APÊNDICE C

DETERMINAÇÃO DO VOLUME TRAPEZOIDAL POR CAMADAS EM SILOS COM BASES NÃO CILÍNDRICAS.....	141
---	------------

APÊNDICE D

CIRCUITO PARA MONITORAMENTO DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA UTILIZANDO-SE A TECNOLOGIA 1-WIRE.....	142
---	------------

ANEXO A

NORMATIZAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE VENTILADORES.....	143
--	------------

A-1. Curva Característica do ventilador utilizado no protótipo do silo graneleiro.....	143
--	-----

ANEXO B

COMANDO DE EXECUÇÃO DO COMPILADOR FORTRAN PARA DIVERSAS PLATAFORMAS	144
--	------------

ANEXO C

FUNÇÕES EM LINGUAGEM DE EXPRESSÃO CFX	145
--	------------

ANEXO D

FUNÇÕES ADICIONAIS EM LINGUAGEM DE EXPRESSÃO CFX PARA O PRÉ-PROCESSAMENTO E PROCESSAMENTO.....	146
---	------------

ANEXO E

CONSTANTES PARA AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS GRÃOS.....	147
--	------------

ANEXO F

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE GASES À PRESSÃO ATMOSFÉRICA	149
REFERÊNCIAS.....	150

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1.1 – Pressões parciais de vapor de água no ar, P_v , e na superfície do grão, P_{vg}9
- Figura 1.2 – Estrutura básica dos grãos: (a) trigo; (b) arroz; (c) milho. 14
- Figura 1.3 - Esquema do experimento de filtragem de Darcy.36

CAPÍTULO 2

- Figura 2.1. Volume de controle diferencial..... 48
- Figura 2.2 – Malha computacional para $\Delta x = \Delta y = 0,25m$ com ilustração do esquema de cinco pontos para o operador de Laplace para o problema de difusão de calor. 55
- Figura 2.3 – Discretização do volume de controle.57
- Figura 2.4 – Representação do conceito da Linguagem de Expressão CFX. ..63
- Figura 2.5 – Disposição dos sensores instalados no experimento para coleta de dados com o sistema 1-Wire[®] entre os dias 22/06/2009 a 29/07/2009..... 71
- Figura 2.6 – Perfis de temperatura referente à aquisição de dados no dia 23/07/2009 com sistema 1-Wire[®] utilizando DS-18B20 e DS-9490R com topologia a) bidimensional e b) tridimensional dos sensores, em um galpão avícola, utilizando o algoritmo com base no sistema STRADA (Rocha, 2008).72

CAPÍTULO 3

- Figura 3.1. Exemplo de malhas de pontos para o problema proposto:
a) hexaédrica; b) tetraédrica..... 80

Figura 3.2 – Malha da estrutura formada por elementos hexaédricos.....	81
Figura 3.3 – Representação tridimensional do protótipo do silo graneleiro.	83
Figura 3.4 – Desenho esquemático do protótipo do silo graneleiro.....	84
Figura 3.5 – Desenho esquemático da correia transportadora.....	84
Figura 3.6 – Representação do campo vetorial de velocidade nos planos x-y-z e desenho esquemático do ventilador centrífugo na entrada de ar do protótipo.	85
Figura 3.7 – Representação do campo vetorial de velocidade nos planos x-y-z e desenho esquemático do ventilador axial na entrada de ar do protótipo.	85
Figura 3.8 – Representação esquemática de uma rede 1-Wire™ para aquisição e transmissão de dados.	88
Figura 3.9 – Pontos de instrumentação na massa de grãos.	89
Figura 3.10 – Representação esquemática do encasulamento dos sensores de temperatura e umidade relativa.....	89
Figura 3.11 – Disposição e fixação dos sensores de temperatura e umidade relativa utilizando-se cabo de aço: (a) rede formada no centro do protótipo; (b) na cobertura do protótipo; (c) no fundo trapezoidal.	90

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Representação esquemática do túnel de vento e da localização dos sensores de temperatura e de umidade relativa com e sem invólucro de proteção.....	96
Figura 4.2 – Representação esquemática do invólucro dos sensores de temperatura e de umidade relativa.....	97
Figura 4.3 – Detalhe de refinamento da malha computacional tetraédrica.	102
Figura 4.4 – (A) Representação da variação de temperatura; (B) representação da variação de umidade relativa.	103
Figura 4.5– Simulação do estado transiente da temperatura e umidade relativa para os sensores com invólucros.....	103

Figura 4.6 – (a) Correlação entre a temperatura no interior do invólucro e a temperatura simulada; (b) correlação entre a umidade relativa no interior do invólucro e a umidade relativa simulada.	104
---	-----

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Representação esquemática do invólucro de proteção dos sensores de temperatura e de umidade relativa.....	114
--	-----

Figura 5.2 – Detalhes de refinamento da malha computacional hexaédrica. .	122
---	-----

Figura 5.3- (a) Dados simulados de temperatura externa para períodos de coleta de dados de uma hora; (b) comparação entre os dados simulados e os observados, mostrando que não há diferença estatística significativa entre eles ($p = 0,547$, $n = 3600$).	123
--	-----

Figura 5.4 - (a) Dados simulados de temperatura máxima e mínima externas para períodos de 24 horas, mostrando que não houve diferença estatisticamente significativa entre eles ($p = 0,457$; $n = 300$); (b) comparação entre os dados coletados e os simulados do teor de água no interior da massa de grãos.	124
---	-----

Figura 5.5 - Simulação de acionamento do sistema de aeração: (a) fluxo de ar controlado com temperatura de 10°C e umidade relativa de 60%; (b) fluxo de ar com temperatura mínima diária e umidade relativa média diária.	125
--	-----

Figura 5.6 - Simulação do teor de umidade na massa de grãos.	126
---	-----

APÊNDICES

Figura B.1 – Representação esquemática dos perímetros com a área de seção transversal do protótipo do silo graneleiro.	140
---	-----

Figura C.1 – Representação das dimensões trapezoidais do silo.	141
---	-----

Figura D.1 – Esquema do circuito de temperatura e umidade relativa com tecnologia 1-Wire (Awtrey, 2001).	142
---	-----

Figura D.2 – Esquema para impressão e montagem do circuito integrado. ... 142

ANEXOS

Figura A.1 – Representação esquemática da padronização pela Air Moving and Conditioning Association (AMCA) para testes laboratoriais em ventiladores..... 143

Figura A.2 – Curva característica do ventilador centrífugo utilizado no protótipo do silo graneleiro. 143

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 – Equações para ajustes de isotermas de sorção de teor de água de equilíbrio	11
Tabela 1.2 – Parâmetros da equação de Henderson modificada para alguns produtos	12
Tabela 1.3 – Parâmetros da equação de Chung-Pfost para alguns produtos ..	12
Tabela 1.4 – Dimensões e massa para grãos de trigo, arroz e milho.....	13
Tabela 1.5 – Massa proporcional das principais partes dos grãos de trigo, arroz e milho	14
Tabela 1.6 – Composição química dos grãos de trigo, arroz e milho, com teor de água de 14 %	16
Tabela 1.7 – Teores de água recomendados para colheita e armazenagem para grãos de trigo, arroz e milho.....	17
Tabela 1.8 – Composição do ar atmosférico seco ao nível do mar	18
Tabela 1.9 – Constantes da Equação (1.6).....	21
Tabela 1.10 - Valores para coeficientes de difusão binária, D_{ij} , em condições de temperatura ambiente	27
Tabela 1.11 – Viscosidade dinâmica (μ), massa específica (ρ) e viscosidade cinemática (ν), em condições de temperatura ambiente, para alguns fluidos	29
Tabela 1.12 – Relações entre fluxos e gradientes para transporte	30

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Valores de k_1 , k_2 e d_p para grãos de milho e de soja.....	47
Tabela 2.2 - Valores de A e B para grãos de milho (Brooker et al., 1974).....	48

Tabela 2.3 - Constantes para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção para grãos (Brooker et al., 1974)	52
Tabela 2.4 – Dispositivos da série 1-Wire™	69

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Correspondência entre a equação geral de transporte, Equação (3.1), e as Equações (2.6), (2.9), (2.10) e (2.11)	79
Tabela 3.2 – Parâmetros dimensionais.....	87
Tabela 3.3 – Conjunto Π de adimensionais	87

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Média dos grupos de variáveis do processo para os sensores com invólucros e sem invólucros.....	104
--	-----

APÊNDICES

Tabela A.1 – Parâmetros dimensionais e conjunto de dimensões fundamentais (Primárias)	131
---	-----

ANEXOS

Tabela B.1 – Comandos para execução do compilador FORTRAN em cada plataforma associada	144
Tabela C.1 – Funções matemáticas padrão na Linguagem de Expressão CFX.....	145
Tabela D.1 – Funções adicionais na Linguagem de Expressão CFX para o pré-processamento e processamento	146
Tabela E.1 – Constantes para calcular o coeficiente de transferência calor por convecção dos grãos	147

Tabela E.2 – Constantes para calcular a condutividade térmica de vários grãos.....	148
Tabela E.3 – Constantes para calcular o calor específico de vários grãos.....	148
Tabela F.1 – Propriedades termofísicas de gases à pressão atmosférica	149

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPÍTULO 1

Equação (1.1)	Teor de água na base úmida	7
Equação (1.2)	Teor de água em base seca	7
Equação (1.3) e (1.4)	Relações entre a base úmida e a base seca	7
Equação (1.5)	Umidade relativa do ar do ambiente	8
Equação (1.6)	Atividade de água	9
Equação (1.7)	Henderson modificada	10
Equação (1.8) e (1.9)	Reações químicas da respiração	16
Equação (1.10)	Pressão de saturação	20
Equação (1.11)	Pressão de vapor de saturação	20
Equação (1.12)	Razão de mistura	21
Equação (1.13)	Razão de mistura para um gás ideal	21
Equação (1.14)	Pressão atmosférica	22
Equação (1.15)	Razão de mistura	22
Equação (1.16)	Umidade relativa	22
Equação (1.17) (1.20)	Volume específico	22
Equação (1.21)	Entalpia específica	23
Equação (1.22)	Entalpia do vapor de água	23
Equação (1.23) e (1.24)	Entalpia total da mistura ar seco-vapor de água	23
Equação (1.25)	Coeficiente de difusão	27
Equação (1.26)	Viscosidade dinâmica	29
Equação (1.27)	Número de Reynolds	30
Equação (1.28)	Fourier	32
Equação (1.29)	Primeira lei de Fick	32
Equação (1.30) e (1.31)	Segunda Lei de Fick	33

Equação (1.32)	Número de Mach	33
Equação (1.33) e (1.34)	Escoamento irrotacional.....	34
Equação (1.35) a (1.43)	Lei de Darcy.....	35
Equação (1.44)	Porosidade	38
Equação (1.45)	Tortuosidade em duas dimensões.....	39
Equação (1.46)	Variação de pressão na corrente livre na região fora da camada-limite.....	40
Equação (1.47)	Força de empuxo e o escoamento gerado em função da variação da massa específica	40
Equação (1.48)	Equação de Momento	40
Equação (1.50) (1.51)	Coeficiente de Expansão Volumétrica Térmica	40
Equação (1.52)	Aproximação de Boussinesq	40

CAPÍTULO 2

Equação (2.1)	Taxa de fluxo de ar.....	46
Equação (2.2)	Força resistiva.....	46
Equação (2.3) e (2.4)	Permeabilidade	47
Equação (2.5) a (2.8)	Vetor gradiente de pressão e velocidade no escoamento de fluido em meio poroso.....	47
Equação (2.9) a (2.11)	Balanços de calor e de massa no volume de controle	49
Equação (2.12) a (2.14)	Taxa de secagem em camada fina	50
Equação (2.15)	Henderson modificada.....	50
Equação (2.16)	Calor latente de evaporação da água do grão de milho	50
Equação (2.17)	Calor específico de grãos de milho.....	51
Equação (2.18)	Massa específica de grãos de milho.....	51
Equação (2.19) e (2.20)	Porosidade da massa de grãos e a área específica média	51

Equação (2.21) e (2.22)	Coeficiente de transferência de calor por convecção.....	51
Equação (2.23) e (2.24)	Conservação da Massa	53
Equação (2.25) e (2.26)	Conservação da quantidade de movimento	53
Equação (2.27) a (2.29)	Conservação da quantidade de energia.....	54
Equação (2.30) a (2.37)	Discretização da equação de Laplace por meio de diferenças	56
Equação (2.38) a (2.40)	Discretização do volume de controle.....	57
Equação (2.41) e (2.42)	Diferenças finitas compacto de quarta-ordem	58
Equação (2.43) e (2.44)	Conjunto de produtos adimensionais ou Grupos- Π	65

CAPÍTULO 3

Equação (3.1)	Processo de resfriamento de uma massa de grãos armazenada	78
Equação (3.2) e (3.3)	Número de Reynolds	86

CAPÍTULO 4

Equação (4.1) a (4.7)	Equação de Energia	99
Equação (4.8)	Umidade relativa.....	100
Equação (4.9)	Pressão de vapor de saturação	101

CAPÍTULO 5

Equação (5.1)	Equação de energia em meios porosos.....	116
Equação (5.2)	Condutividade térmica efetiva.....	117
Equação (5.3)	Tensor de tensão.....	117

Equação (5.4)	Difusão de calor em regime transiente	118
Equação (5.5)	Teor de água de equilíbrio	119
Equação (5.6)	Umidade relativa do ar	119
Equação (5.7)	Pressão de vapor de água.....	119
Equação (5.8)	Pressão de vapor saturado.....	119

APÊNDICES

Equação (A.1)	Número de Reynolds.....	135
Equação (A.2)	Número Froude	136
Equação (A.3)	Número de Eckert.....	136
Equação (A.4)	Número de Nusselt.....	136
Equação (A.5)	Número de Biot	137
Equação (A.6)	Número de Prandtl	137
Equação (A.7)	Número Peclet.....	137
Equação (A.8)	Número de Grashof	137
Equação (A.9)	Número Rayleigh.....	138
Equação (A.10)	Número de Nusselt por McAdams	139
Equação (B.1)	Diâmetro hidráulico.....	140
Equação (B.2)	Diâmetro hidráulico do silo graneleiro.....	140
Equação (C.1)	Volume total do trapezóide	141

ANEXOS

Equação (E.1)	coeficiente de transferência de calor por convecção h para grãos	147
---------------	--	-----

RESUMO

ROCHA, Keller Sullivan Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Modelagem e simulação do processo de resfriamento de grãos armazenados em silos graneleiros por meio das leis de conservação de energia e massa.** Orientador: José Helvecio Martins. Coorientadores: Marcio Arêdes Martins e Adílio Flauzino de Lacerda Filho.

Neste trabalho, foi realizada a modelagem do efeito da interação fluido-matriz porosa, incluindo o acoplamento matemático entre as equações de transferência de calor das fases sólida e fluida, para processos de resfriamento e, ou, aquecimento de grãos armazenados. Os dados experimentais permitiram validar o modelo implementado em Dinâmica dos Fluidos Computacional e caracterizar os transportes de calor e de massa no interior da massa de grãos. Condições simuladas do ar utilizado na aeração permitiram estabelecer, computacionalmente, a temperatura e a umidade relativa do ar mais adequada para a aeração da massa de grãos. Esses procedimentos permitem prever condições em certos cenários e torna possível minimizar as perdas causadas por infestação de insetos-praga e o uso de energia elétrica, utilizando sistema de controle inteligente que pode ser simulado para diversas situações ambientais. Essas simulações permitem projetar sistemas de aeração otimizados. Este trabalho consistiu das seguintes etapas: (1) Construção de um protótipo para testes de validação do modelo; (2) Implementação de um modelo computacional de transferência de calor, massa e quantidade de movimento para simulação de sistemas de invólucro de proteção dos sensores de temperatura e umidade relativa; (3) Implementação de um modelo computacional de transferência de calor, massa e quantidade de movimento para simulação de sistemas de resfriamento (ou de aquecimento) em silos graneleiros, utilizando a dinâmica dos fluidos computacional; (4) Simulação do processo de resfriamento da massa de grãos armazenados em silos graneleiros em dois cenários e análise dos parâmetros do modelo para otimização do sistema. Os resultados da simulação permitiram avaliar o desempenho do processo de resfriamento da massa de grãos.

ABSTRACT

ROCHA, Keller Sullivan Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Modeling and simulation of the cooling process of grain stored in bins with trapezoidal floor through the energy and mass conservation laws.** Adviser: José Helvecio Martins. Co-Advisers: Marcio Arêdes Martins and Adílio Flauzino de Lacerda Filho.

This work aimed at the modeling of the interaction of the fluid and porous matrix, including the coupling between the mathematical equations of heat transfer in the solid fluid phases for cooling and, or, heating process of stored grains. The experimental data allowed validating the model implemented in Computational Fluid Dynamics and characterizing the heat and mass transfer within the grain mass. Simulated conditions of the air used in aeration allowed to establish, computationally, the appropriate temperature and relative humidity the grain mass aeration. These procedures allow predicting conditions in certain scenarios and make it possible to minimize losses caused by infestation of insects and the use of electric energy by using intelligent control system which can be simulated for various environmental situations. These simulations allow for designing optimized aeration systems. This work consisted of the following steps: (1) Construction of a prototype for testing and validation of the model; (2) Implementation of a computational model of heat, mass and momentum transfer for simulating enclosures (casing) to protect the temperature and relative humidity sensors; (3) Implementation of a computational model of heat, mass and momentum transfer for simulation cooling (or heating) systems in horizontal (graneleiro) bins using computational fluid dynamics; (4) Simulation of the cooling process of the grain mass stored in horizontal bins (graneleiros) in two scenarios and analysis of the parameters model for system optimization. The simulation results allow evaluating the performance of the cooling process of the grain mass.

INTRODUÇÃO

A produção de grãos cresce anualmente de forma acentuada devido ao aumento de produtividade das culturas, proporcionado pela aplicação de tecnologia aos sistemas de produção. Porém, a capacidade de armazenagem de grãos no Brasil não tem acompanhado o crescimento das safras, principalmente devido ao elevado custo da infra-estrutura de armazenamento (Nogueira Junior & Tsunehiro, 2005).

A capacidade estática de armazenagem no Brasil, de acordo com o levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, em agosto de 2011, é de, aproximadamente, 139,3 milhões de toneladas, e desse total, 113,8 milhões são referentes ao tipo granel (CONAB, 2011).

A estrutura de armazenamento brasileira está distribuída em 13.719 unidades, sendo 6.722 destinadas à armazenagem a granel (Weber, 2005). Os silos e armazéns graneleiros compreendiam, em média, 72,2 % da capacidade total de armazenagem na fazenda, em 2004, e os armazéns convencionais a 27,8 %. Na zona rural, excluindo-se as fazendas, esses percentuais eram, respectivamente, de 81,6 % e 18,4 %, enquanto na zona urbana, a distribuição era semelhante à das fazendas, entre 71 % e 29 %, respectivamente (Nogueira Junior & Tsunehiro, 2005).

Os silos horizontais (graneleiros) são amplamente utilizados no Brasil e possibilitam recursos de movimentação de carga e descarga mecanizada, como elevadores e correias transportadoras, máquinas de limpeza e secadores, sistemas de aeração e termometria. O aumento de temperatura na massa de produtos armazenados faz aumentar a atividade respiratória dos grãos, fazendo com que haja maior liberação de calor, de dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água, induzindo à rápida deterioração do produto armazenado, produzindo grãos ardidos e proporcionando um ambiente ideal para proliferação de insetos e fungos.

As condições propícias para a ocorrência de deterioração do produto armazenado são devidas, principalmente, ao fenômeno de migração de umidade no interior da massa de grãos, induzida pelos gradientes de temperatura na massa de grãos armazenada. Por isso, a temperatura e o teor

de água dos grãos são considerados os fatores mais importantes no controle da qualidade durante a armazenagem (Chang & Weng, 2002). Para limitar o crescimento de microorganismos prejudiciais é necessário manter a temperatura e o teor de água do grão em certos níveis. A migração de umidade na massa de grãos armazenada é, geralmente, proporcionada pelas variações sazonais diurnas da temperatura ambiente. Para atingir um equilíbrio local com o ar nas vizinhanças, os grãos localizados nas regiões mais quentes perdem umidade, enquanto que os grãos localizados em regiões mais frias ganham umidade. O problema simultâneo de transferência de calor e de massa (migração de umidade) ocorre porque os processos de transferência de calor latente existem de forma heterogênea na massa de grãos, proporcionando uma distribuição de concentração de água e de temperatura na massa de grãos, causando correntes convectivas.

Objetivou-se com esta proposta desenvolver, implementar e validar uma metodologia computacional para prever o resfriamento da massa de grãos, com base nos processos de transferência de calor e de massa em silos graneleiros, considerando os mecanismos simultâneos de convecção e de difusão de calor e de massa. Para a solução do problema de transporte de calor e de massa foi utilizada a Dinâmica dos Fluidos Computacional. Por meio dessa técnica, o desempenho dos processos de resfriamento ou aquecimento da massa de grãos armazenada pode ser estudado e melhorado. Esses processos foram constatados por meio da observação do comportamento dos grãos durante o armazenamento sem aeração e, posteriormente simulados cenários com utilização de um fluxo de ar forçado, que percola a massa de grãos (meio poroso). Os resultados da simulação durante o armazenamento sem aeração foram comparados aos dados experimentais de grãos de milho com o objetivo de validar o modelo implementado em Dinâmica dos Fluidos Computacional e caracterizar os transportes de calor e de massa. Este modelo poderá ser utilizado em projetos de sistema de monitoramento, assim como na caracterização de novos cenários para controle do processo de aeração em silos graneleiros, visando à preservação da qualidade do produto armazenado.

Portanto, a relevância do presente trabalho consiste na modelagem detalhada e consistente do efeito da interação fluido-matriz porosa, incluindo o acoplamento matemático entre as equações de transferência de calor das

fases sólida e fluida, para aplicação em processos resfriamento e, ou, aquecimento de grãos armazenados. A comparação dos resultados da simulação com dados experimentais permitiu validar o modelo implementado em Dinâmica dos Fluidos Computacional e caracterizar os transportes de calor e de massa no interior da massa de grãos. As condições simuladas do ar utilizado na aeração foram condicionadas, o que permitiu estabelecer computacionalmente a temperatura e a umidade relativa do ar mais adequada para a aeração da massa de grãos, proporcionando seu resfriamento. Com esses procedimentos, além de prever condições em certos cenários, é possível minimizar as perdas causadas por infestação de pragas e o uso de energia elétrica, haja vista que o sistema de controle pode ser simulado para diversas situações ambientais, o que permitirá o funcionamento dos equipamentos elétricos (principalmente o conjunto motor-ventilador) quando for estritamente necessário. Portanto, a relevância deste trabalho pode ser resumida nos itens apresentados a seguir.

- (1) Construção de uma unidade piloto para testes de validação do modelo e posterior implementação em escala real com base nos resultados.
- (2) Implementação de um modelo computacional de transferência de calor, de massa e de quantidade de movimento para simulação de sistemas de proteção (invólucro de proteção) dos sensores de temperatura e umidade relativa para instrumentação em silos graneleiros.
- (3) Implementação de um modelo computacional de transferência de calor, de massa e de quantidade de movimento para simulação de sistemas de armazenamento e de resfriamento (ou de aquecimento) em silos graneleiros, utilizando a dinâmica dos fluidos computacional.
- (4) Com a simulação do processo de resfriamento da massa de grãos armazenados em silos graneleiros em diversos cenários é possível realizar a análise dos parâmetros do modelo para otimização do sistema.
- (5) Os resultados da simulação permitem avaliar o desempenho do processo de resfriamento da massa de grãos.

Portanto, neste trabalho, teve-se como objetivo realizar a modelagem matemática detalhada e consistente do processo de transferência de calor e massa que levasse em consideração o efeito da interação fluido-matriz porosa,

incluindo o acoplamento matemático entre as equações de transferência de calor das fases sólida e fluida, para aplicação em processos de armazenamento e resfriamento de grãos.

REFERÊNCIAS

- Chang, W. J.; Weng, C. I. ***Heat and Mass Transfer in Porous Material***. Department of Mechanical Engineering, Kun Shan University of Technology. D. B. Ingham and I. Pop. Tainan, Taiwan, Pergamon - Elsevier Science: 469 (2002).
- CONAB. ***Evolução da Capacidade Estática dos Armazéns***. (2011).
- Nogueira Junior, S.; Tsunechiro, A. ***Produção Agrícola e Infra-Estrutura de Armazenagem no Brasil***. Informações Econômicas 35(2) (2005).
- Weber, É. A. ***Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos***. Panambi, Salles (2005).

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

1-1. Propriedades Físicas na Aeração

Para o grão, o ambiente de armazenagem é um ecossistema em que estão presentes os elementos abióticos (sem vida), como ar intergranular e as impurezas; e os bióticos (organismos vivos), tais como a massa de grãos, insetos, fungos, bactérias e ácaros (Silva, 2008). O resfriamento da massa de grãos é empregado com o objetivo de inviabilizar o desenvolvimento de fungos e insetos, preservando, assim, a qualidade do produto. Em condições de temperaturas acima de 25°C e teor de água acima de 16%, ocorre o rápido desenvolvimento de fungos e insetos. Os danos causados por insetos são percebidos somente depois de um mês de infestação, enquanto que os causados pelos fungos são observados em poucos dias. Esta diferença de tempo é em função do ciclo de vida destes agentes. Quando os grãos armazenados são secados até atingirem teores de água abaixo de 14%, geralmente, o desenvolvimento de fungos é bloqueado. Com este teor de água, a umidade relativa do ar intergranular é estabilizada em valores inferiores a 60%, inviabilizando o desenvolvimento de fungos e bactérias, mas não impede a proliferação de insetos. Insetos não se multiplicam em ambientes com umidade relativa mantida abaixo de 40% ou em temperatura mantida abaixo de 10°C (Brooker et al., 1974; Brooker et al., 1992).

Para o emprego de técnicas de resfriamento algumas recomendações devem ser consideradas (Brooker et al., 1974; Brooker et al., 1992; Navarro & Noyes, 2001):

- A massa de grãos deve estar devidamente limpa. A remoção das impurezas facilita a passagem do fluxo de ar resfriado pela massa de grãos facilitando a troca de calor.
- Os grãos com teor de água entre 12,5 e 14% podem ser resfriados para desacelerar o desenvolvimento de insetos e preservar a qualidade do produto.

- Grãos com teores de umidade entre 14 e 16 % podem ser refrigerados. Entretanto, serão observados danos causados por insetos e fungos.
- Grãos com teores de água acima de 16 % necessitam, obrigatoriamente, de serem secos antes da insuflação do ar resfriado.

O teor de água dos grãos pode ser expresso, basicamente, de duas formas: em base úmida ou em base seca.

O teor de água na base úmida é a relação entre a quantidade de massa de água e a quantidade de massa total do produto.

$$M_{bu} = \frac{W_a}{W_{ms} + W_a} \quad (1.1)$$

em que

M_{bu} - Teor de água, em base úmida, decimal;

W_a - Quantidade de massa de água contida no grão, (kg);

W_{ms} - Quantidade de massa de matéria seca contida no grão, (kg).

O teor de água em base seca, M_{bs} , é a relação entre a quantidade de massa de água e a quantidade de massa de matéria seca contida no produto.

$$M_{bs} = \frac{W_a}{W_{ms}} \quad (1.2)$$

O teor de água em base úmida pode ser transformado para a base seca e vice-versa. As relações entre as duas bases são apresentadas a seguir.

$$M_{bu} = \frac{M_{bs}}{1 + M_{bs}} \quad (1.3)$$

$$M_{bs} = \frac{M_{bu}}{1 - M_{bs}} \quad (1.4)$$

É comum expressar o teor de água em base úmida, em porcentagem, uma vez que é uma variável cujo valor está entre 0 % e 100 %. Já o teor de

água em base seca é geralmente expresso em decimal, uma vez que essa variável pode ter valores entre zero e infinito.

O comportamento dos grãos e de seus subprodutos durante o armazenamento é dependente da temperatura e do teor de água do produto.

A água contida nos grãos se apresenta em diferentes formas, em função da natureza das ligações químicas existentes entre os componentes da matéria seca e as moléculas de água, determinando, assim, os diferentes níveis de hidratação do produto. Para remover um quilograma de água de um produto, geralmente é consumido entre 4000 e 5000 kJ de energia. Quando os grãos são colhidos com elevado teor de água, o consumo de energia, somente na etapa de secagem, pode chegar a até 60 % de toda a energia usada na produção destes grãos (Brooker et al., 1992).

Uma determinada quantidade de água pode ser mantida livremente nos espaços correspondentes aos poros existentes nos grãos, ou seja, mantida ligada fracamente no sistema por forças capilares, sendo denominada água de impregnação. É mantida no grão mecanicamente, pelas paredes celulares. A presença de água livre no grão torna-o inapto para o armazenamento, pois pode haver desenvolvimento de fungos e bactérias. Este tipo de água é facilmente evaporado no processo de secagem.

O termo geral **sorção** é usado para denotar a interação entre a água e a substância adsorvedora. Os termos gerais adsorção e dessorção são usados para denotar o processo de ganhar ou perder água por sorção, respectivamente. Essa classificação dos tipos de água presentes nos grãos é meramente uma colocação em categorias usuais. Na Figura 1.1 é representado um ambiente (ar) a uma determinada temperatura, T , e umidade relativa, U_r , constantes, no qual é colocado um grão qualquer.

A umidade relativa do ar do ambiente é dada por:

$$U_r = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \cdot 100 \quad (1.5)$$

em que

U_r - Umidade relativa do ar, %;

P_v - Pressão de vapor de água presente no ar, (Pa);

P_{vs} - Pressão de vapor de água presente no ar saturado à temperatura de bulbo seco, (Pa).

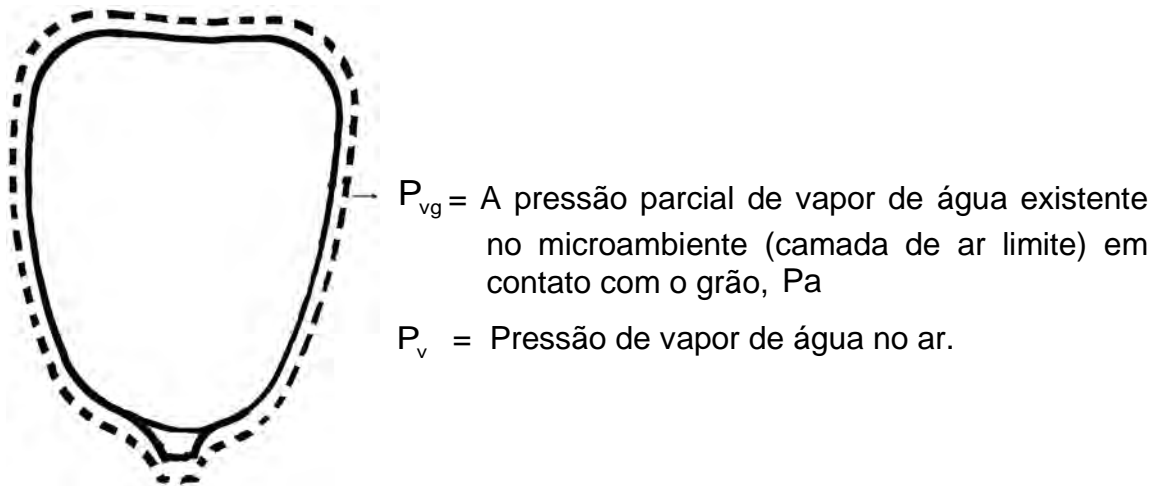


Figura 1.1 – Pressões parciais de vapor de água no ar, P_v , e na superfície do grão, P_{vg} .

Quando o grão está em equilíbrio higroscópico com o ar que o envolve, não ocorre troca recíproca de umidade (água) entre o ar e o grão, por não haver diferença de pressão parcial entre o vapor de água na superfície do grão e o vapor de água presente no ar. Neste caso, $P_v = P_{vg}$.

A relação entre a pressão parcial de vapor de água existente no microambiente (camada de ar limite) em contato com o grão e a pressão de vapor de água saturado presente no ar à temperatura de bulbo seco é definida atividade de água.

$$a_w = \frac{P_{vg}}{P_{vs}} \quad (1.6)$$

em que:

a_w - Atividade de água no grão, decimal

Quando os grãos se encontram em equilíbrio higroscópico com o ar nas suas vizinhanças, a sua atividade de água é idêntica à umidade relativa do ar. Nesse caso, o teor de água do grão é igual ao teor de água de equilíbrio para as condições dominantes de temperatura e umidade relativa do ar.

O teor de água de equilíbrio é o teor de água de um material higroscópico depois de exposto a um ambiente sob condições de temperatura e umidade relativa controladas, depois de um longo período de tempo.

Um material está higroscopicamente em equilíbrio com o ambiente onde se encontra quando a pressão de vapor de água correspondente ao teor de água do material for igual à pressão de vapor de água do ar no ambiente que o circunda.

Os valores de teor de água de equilíbrio dos produtos biológicos dependem, principalmente, da temperatura, umidade relativa do ar, e da espécie ou variedade do produto.

Diversos modelos teóricos, semiteóricos e empíricos têm sido propostos para expressar o teor de água de equilíbrio de grãos. Entretanto, os modelos teóricos não são capazes de prever, com precisão satisfatória, o teor de água de equilíbrio de grãos e cereais, em todas as faixas de temperatura e umidade relativa do ar. A Tabela 1.1 contém os modelos mais comuns utilizados para calcular o teor de água de equilíbrio de grãos e cereais (Corrêa et al., 1998; Park et al., 2001).

A equação de Henderson e a de Chung-Pfost são as que melhor expressam o teor de água de equilíbrio em grãos, para faixas mais amplas de temperatura e umidade relativa. No entanto, modificações empíricas melhoram substancialmente essas equações (Navarro & Noyes, 2001).

A equação de Henderson modificada pode ser apresentada da seguinte forma:

$$M_e = 0,01 \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-k(T + C)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1.7)$$

A Tabela 1.2 contém os valores dos parâmetros da equação de Henderson modificada, para diversos produtos.

Na equação de Henderson, bem como na de Chung-Pfost, a atividade de água, a_w , é idêntica à umidade relativa de equilíbrio, U_r .

Tabela 1.1 – Equações para ajustes de isotermas de sorção de teor de água de equilíbrio

Modelo	Equação
Langmuir	$\frac{M_e}{M_m} = \frac{C \cdot a_w}{1 + C \cdot a_w}$
B.E.T	$M_e = \frac{(M_m \cdot C \cdot a_w)(1 - (n+1)a_w^n + n \cdot a_w^{n+1})}{(1 - a_w)(1 + (C-1)a_w - C \cdot a_w^{n+1})}$
B.E.T linearizado	$\frac{a_w}{(1 - a_w)M_e} = \frac{1}{M_m \cdot C} + \frac{a_w(C-1)}{M_m \cdot C}$
G.A.B	$M_e = \frac{M_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)}$
Halsey	$a_w = \exp\left(\frac{-A}{M_e^B}\right)$
Oswin	$M_e = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^n$
Peleg	$M_e = K_1 \cdot a_w^{n_1} + K_2 \cdot a_w^{n_2}$
Henderson	$1 - a_w = \exp\left[-(k \cdot M_e^n)\right]$
Chung & Pfost	$\ln(a_w) = -\left(\frac{A}{R \cdot T}\right) \exp(-B \cdot M_e)$

Constantes das equações: A,B,C,D,E, n, K, k, K₁, K₂, n₁, n₂

em que:

M_e - Teor de água de equilíbrio, kg · kg⁻¹;

M_m - Teor de água na monocamada molecular, kg · kg⁻¹;

a_w - Atividade de água, adimensional;

T - Temperatura, °C;

R - Constante universal dos gases.

Tabela 1.2 – Parâmetros da equação de Henderson modificada para alguns produtos

Produto	Parâmetros		
	K	C	N
Cevada	$2,2919 \cdot 10^{-5}$	195,267	2,0123
Feijão	$2,0899 \cdot 10^{-5}$	254,23	1,8812
Milho	$8,6541 \cdot 10^{-5}$	49,810	1,8634
Amendoim em grão	$65,0413 \cdot 10^{-5}$	50,561	1,4984
Amendoim com casca	$6,6587 \cdot 10^{-5}$	23,318	2,5362
Arroz com casca	$1,9187 \cdot 10^{-5}$	51,161	2,4451
Sorgo	$0,8532 \cdot 10^{-5}$	113,725	2,4757
Soja	$50,3633 \cdot 10^{-5}$	43,016	1,3628

Fonte: (Navarro & Noyes, 2001)

A Tabela 1.3 contém os valores dos parâmetros da equação de Chung-Pfost, para diversos produtos.

Tabela 1.3 – Parâmetros da equação de Chung-Pfost para alguns produtos

Produtos	Parâmetros		
	A	B	C
Cevada	761,74	19,889	91,323
Feijão	671,78	14,964	120,098
Milho	312,31	16,958	30,205
Sorgo	1099,68	19,644	102,849
Soja	138,45	14,967	24,576

Fonte: (Navarro & Noyes, 2001)

1-2. Propriedades Físicas, Químicas e Biológicas de Grãos

O conhecimento da estrutura, composição e propriedades físicas é fundamental para o estudo da secagem e para as características de armazenagem dos grãos. A estrutura do grão pode afetar as taxas de secagem. O rompimento de sua película externa pode aumentar a taxa de com

que o grão perde água para o meio em suas vizinhanças ou ganha água dele. Esta película externa protege o grão contra proliferação de microorganismos, podendo oferecer também resistência á infestação de insetos. No caso de grãos quebrados ou danificados, há maior exposição da superfície desprotegida e, como conseqüência, aumenta a taxa respiratória dos grãos, o que facilita ações microbianas e enzimáticas. O aumento da acidez é uma conseqüência deste processo. A forma, tamanho, massa específica e outras características físicas podem afetar o desempenho das máquinas de limpeza, de secagem e de beneficiamento. A proporcionalidade relativa entre os componentes químicos dos grãos podem afetar as características indispensáveis à industrialização durante a separação do gérmen (Silva, 2000).

1-2.1. *Propriedades Físicas e Biológicas dos grãos*

A massa, as dimensões e a estrutura dos grãos afetam o comportamento de secagem. Os grãos de milho secam mais lentamente devido à sua massa e diâmetro equivalente, enquanto os grãos de trigo atingem o teor de água de equilíbrio com valores mais alto, devido à sua baixa porcentagem de gérmen.

Dados como dimensões e massa foram tabulados e a massa proporcional das principais partes de cada grão (trigo, arroz e milho) são apresentadas na Tabela 1.4 e na Tabela 1.5, respectivamente.

Os grãos como trigo, arroz e milho são formados basicamente pelo tegumento (também chamado de cobertura protetora) e embrião, como exemplificado na Figura 1.2. Outro possível componente é o endosperma, cada qual exercendo funções específicas.

Tabela 1.4 – Dimensões e massa para grãos de trigo, arroz e milho

Grãos	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Diâmetro Equivalente (mm)	Massa do Grão (mg)
Trigo	5 – 8	2,5 – 4,5	3,7 – 4,5	30 – 45
Arroz	5 – 10	1,5 – 5	5,2 – 4,6	23 – 27
Milho	8 – 17	5,0 – 15	7,8 – 9,8	150 – 600

Fonte: (Brooker et al., 1992)

Tabela 1.5 – Massa proporcional das principais partes dos grãos de trigo, arroz e milho

Grãos	Pericarpo (%)	Germe (%)	Endoderma (%)
Trigo	13 – 15	2 – 3	82 – 85
Arroz	5 – 7	3 – 4	89 – 92
Milho	5 – 7	10 – 12	82 – 84

Fonte: (Brooker et al., 1992)

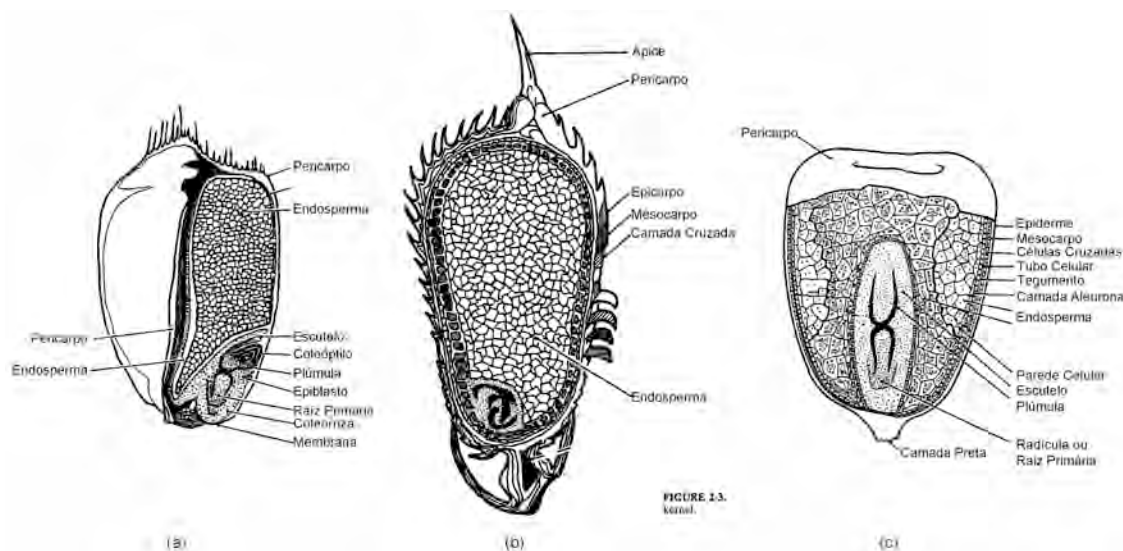


Figura 1.2 – Estrutura básica dos grãos: (a) trigo; (b) arroz; (c) milho. (Brooker et al., 1974; Brooker et al., 1992; Sauer, 1992).

1-2.1.1. Cobertura Protetora (tegumento)

Consiste na parte externa que delimita o grão, com função protetora, reguladora e delimitadora. Mantém unidas as partes internas do grão, protege as partes internas contra choques e abrasões, serve como barreira à penetração de microorganismos, regula a velocidade de reidratação, evita ou diminui os possíveis danos causados pelas pressões desenvolvidas durante a embebição; regula a velocidade entre as trocas gasosas e germinação e, em alguns casos, provoca dormência nas sementes.

1-2.1.2. Eixo Embrionário

Parte vital do grão, por apresentar a capacidade de se desenvolver. Por meio de divisões celulares, o eixo embrionário desenvolve em dois sentidos

(raízes ou caules), podendo, assim, originar uma plântula com potencial para se fixar no solo e fotossintetizar as substâncias necessárias para o seu desenvolvimento.

1-2.1.3. Tecidos Reservas

Podem ser constituídos por endosperma, cotilédones e, em alguns casos, pelo perisperma. Nestes tecidos, o eixo embrionário no processo de germinação adquire energia e material metabolizado para se desenvolver e originar uma plântula autotrófica, ou seja, capaz de sintetizar suas próprias substâncias orgânicas por meio da fotossíntese (Silva, 2000).

O conhecimento das características físicas dos grãos é de grande importância para a construção e operação de equipamentos de secagem e armazenagem.

Quando o grão atinge a maturação fisiológica, ocorre a independência da semente da planta-mãe, e o seu vigor atinge o valor máximo. Deste ponto em diante, o vigor será sempre menor, com a perda do seu poder germinativo. Este processo é inevitável e irreversível, e pode ser retardado apenas pela redução máxima da taxa de respiração do grão.

1-2.2. Propriedades químicas dos grãos

Os grãos são materiais higroscópicos, e tem a capacidade de adquirir ou ceder umidade para o meio onde se encontram, seja no campo, interior do silo ou no armazém. Para cada espécie de grão, existe um equilíbrio higroscópico, dependente da temperatura e do estado higrométrico do meio ambiente. Ao respirar, o grão absorve oxigênio e ao mesmo tempo libera calor, umidade e dióxido de carbono, sendo que este processo é acompanhado de uma perda de matéria. A temperatura elevada é um dos fatores que favorecem esta ocorrência e resulta em transpiração. O processo de respiração é acelerado em função da quantidade de umidade absorvida, associado ao processo de elevação de temperatura, resultando em aumento do teor de água no grão, decorrente da intensidade da respiração. A umidade e o calor, resultantes deste processo, criam condições favoráveis para aumento de temperatura e

recomendados teores de água inferiores a 14 %, para prevenir o crescimento de microorganismos, como mostrado na Tabela 1.7.

Tabela 1.7 – Teores de água recomendados para colheita e armazenagem para grãos de trigo, arroz e milho

Grãos	Teor de água máximo para colheita (%)	Teor de água ótimo para colheita (%)	Teor de água para armazenagem	
			Período de 6 a 12 meses (%)	Período maior que um ano (%)
Trigo	20	18	14	13
Arroz	38	22	14	13
Milho	25	23	14,5	13

Fonte: (Brooker et al., 1992)

1-3. Propriedades termodinâmicas do ar

A psicrometria é definida como o ramo da física relacionado com a medida ou determinação das condições atmosféricas, particularmente com respeito à mistura de ar seco e vapor de água, ou parte da ciência que está preocupada com as propriedades termodinâmicas do ar úmido.

O ar é uma mistura de gases e vapor de água. O ar seco é composto de nitrogênio (78%) e oxigênio (21%), sendo o percentual restante (1%), composto por dióxido de carbono e quantidades diminutas de outros gases, tais como, hidrogênio, hélio, neônio, argônio e outros. O vapor de água existe na atmosfera em proporções variáveis, não faz parte da composição do ar atmosférico, usando-a apenas como meio de transporte. É proveniente da evaporação da água o qual é transportado pela circulação atmosférica. Em um dado volume de ar a percentagem de vapor de água varia de um mínimo de 0 % ao máximo de 4 %, em detrimento dos elementos componentes da atmosfera. O ar seco existe quando se removem dele todo o vapor de água e os contaminantes. A composição do ar seco é relativamente constante, apesar das pequenas variações em função da localização geográfica e altitude. A composição média do percentual de ar seco ao nível do mar é apresentada na Tabela 1.8.

As propriedades termodinâmicas da mistura de ar seco e vapor de água são de grande interesse para o setor de pós-colheita de produtos agrícolas,

devido às trocas de umidade que ocorrem entre os produtos biológicos e o ar que o circunda.

Tabela 1.8 – Composição do ar atmosférico seco ao nível do mar

Componente	Fração em volume* (%)	Fração em massa (%)
Nitrogênio (N ₂)	78,1	75,6
Oxigênio (O ₂)	20,9	23,1
Argônio (Ar)	0,934	1,29
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,0314	0,0480
Neônio, Hélio, Criptônio, Hidrogênio e Xenônio	0,0346	-----

* A porcentagem em volume de cada componente do ar indica o volume que este ocuparia se fosse separado de cada 100 L de ar e medidos nas mesmas condições de pressão e temperatura da mistura inicial. Fonte: (GEPEQ, 2008).

A quantidade de vapor de água presente na mistura ar-vapor de água pode variar de zero a um valor correspondente à condição de saturação, sob determinada condição de temperatura e pressão. Diversas propriedades termodinâmicas estão associadas às propriedades do ar úmido (Silva, 2000). São necessárias duas propriedades independentes, além da pressão atmosférica, para estabelecer o estado termodinâmico do ar úmido.

Três propriedades termodinâmicas que caracterizam a quantidade de vapor de água presente no ar úmido estão associadas com temperatura:

- Pressão de vapor (P_v);
- Razão de mistura (R_m);
- Umidade Relativa (U_r).

Outras propriedades de fundamental importância estão relacionadas com o volume ocupado pelo ar ou volume específico (v_e) e com a quantidade de energia contida no ar ou entalpia (h). A entalpia e o volume específico são propriedades da mistura, e são expressas em unidade de massa de ar seco.

O vapor de água presente no ar úmido não saturado exerce determinada pressão (P_v). Quando o ar está saturado de umidade, a pressão de vapor de água é denominada de pressão de saturação (P_{vs}).

A umidade relativa do ar (U_r) é definida como a razão entre a pressão de vapor de água atual no ar (P_v) e a pressão de vapor de água quando o ar se encontra saturado de umidade (P_{vs}) à mesma temperatura.

A troca recíproca de umidade entre materiais higroscópicos tais como grãos e o ar úmido que os circunda ocorre até atingir uma condição de equilíbrio. Em uma condição de temperatura fixa e pressão de vapor correspondente ao teor de água do produto igual à pressão de vapor do ar, o equilíbrio é estabelecido. O teor de água do produto nestas condições é denominado de teor de água de equilíbrio.

1-3.1. Definição das relações do ar com o vapor de água

O ar recebe diferentes denominações em função de sua relação com o vapor de água, como descrito a seguir.

Ar seco: É constituído, basicamente, pela mistura de gases atmosféricos com a exclusão do vapor de água.

Ar úmido: É constituído pelo ar seco incluindo o vapor de água em quantidade inferior à necessária para sua saturação. O ar úmido é a condição normal do ar atmosférico, pois em condições naturais sempre há presença de vapor de água.

Ar saturado: É constituído pela mistura de ar seco incluindo o vapor de água em quantidades correspondentes à pressão de saturação.

Ar supersaturado: É constituído pela mistura de ar seco incluindo o vapor de água em quantidade acima da necessária para atingir a pressão de saturação.

1-3.2. Propriedades termodinâmicas do ar úmido

São estabelecidas propriedades termodinâmicas que permitem quantificar o vapor de água presente no ar, bem como caracterizar as demais condições associadas a ele. Assim, as principais propriedades termodinâmicas do ar úmido são descritas a seguir.

Temperatura de bulbo seco (T_{bs}): Temperatura medida por um termômetro comum no ar ambiente, expresso em °C .

Temperatura de bulbo molhado (T_{bm}): Temperatura indicada por um termômetro, cujo bulbo é mantido úmido por uma gaze embebida em água, exposto a uma corrente de ar, expresso em °C .

Temperatura do ponto de orvalho (T_{po}): Temperatura na qual se inicia a condensação da umidade do ar, quando este é resfriado, expresso em °C .

Pressão de saturação (P_{vs}): Pressão de vapor no ar quando a quantidade de vapor de água nele presente é suficiente para saturá-lo a uma dada temperatura. A pressão de saturação para uma faixa de temperatura de 255,38 K a 273,16 K pode ser expressa pela equação a seguir (Brooker et al., 1967).

$$\ln(P_{vs}) = \frac{31,9602 - 6270,3605}{T} - 0,46057 \cdot \ln(T) \quad (1.10)$$

em que:

P_{vs} - Pressão de saturação, (Pa);

T - Temperatura, (K).

Para a faixa de temperatura absoluta entre 273,16 K e 533,16 K a pressão de vapor de saturação pode ser expressa pela equação como segue.

$$\ln\left(\frac{P_{vs}}{R}\right) = \frac{(A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + E \cdot T^4)}{(F \cdot T - G \cdot T^2)} \quad (1.11)$$

As constantes da Equação (1.6) são definidas na Tabela 1.9.

Tabela 1.9 – Constantes da Equação (1.6)

Valores das constantes	
$R = 22105649,25$	$D = 1,2558 \cdot 10^{-4}$
$A = -27405,526$	$E = -4,8502 \cdot 10^{-8}$
$B = 97,5413$	$F = 4,34903$
$C = -0,146244$	$G = 3,9381 \cdot 10^{-3}$

Razão de mistura (R_m): Definida como a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco em um dado volume da mistura.

$$R_m = \frac{m_v}{m_{ar}} \quad (1.12)$$

em que:

- R_m - Razão de mistura, massa de vapor de água por unidade de massa de ar seco presentes na mistura, ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$);
- m_v - Massa de vapor de água, (kg);
- m_{ar} - Massa de ar seco, (kg).

Assumindo que o ar se comporte como um gás ideal, a razão de mistura pode ser determinada pela expressão:

$$R_m = \frac{P_v \cdot M_v}{P_{ar} \cdot M_{ar}} \quad (1.13)$$

em que:

- M_v - Massa molecular do vapor de água, ($18,02 \text{ kg} \cdot (\text{kg mol})^{-1}$);
- M_{ar} - Massa molecular do ar, ($28,97 \text{ kg} \cdot (\text{kg mol})^{-1}$);
- P_v - Pressão de vapor de água, (Pa);
- P_{ar} - Pressão do ar seco, (Pa).

A pressão atmosférica (P_{atm}) é a soma da pressão de vapor de água e a pressão do ar seco.

$$P_{atm} = P_v + P_{ar} \quad (1.14)$$

Utilizando a Equação (1.13) e substituindo os valores das massas moleculares do vapor de água e do ar na Equação (1.14) obtém-se:

$$R_m = \frac{P_v}{1,605(P_{atm} - P_v)} \quad (1.15)$$

Umidade relativa (U_r): É a razão entre a pressão de vapor (P_v) contido no ar e a pressão de vapor saturado (P_{vs}) para a mesma temperatura, expressa em porcentagem.

$$U_r = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \cdot 100 \quad (1.16)$$

Volume específico (v_e): Definido como o volume de ar úmido (V_{ar}) por unidade de massa de ar seco (m_{ar}).

$$v_e = \frac{V_{ar}}{m_{ar}} \quad (1.17)$$

Novamente, considerando o ar como um gás perfeito tem-se:

$$P_{ar} \cdot V_{ar} = \frac{m_{ar} \cdot R \cdot T}{M_{ar}} \quad (1.18)$$

Portanto, obtém-se:

$$v_e = \frac{V_{ar}}{m_{ar}} = \frac{R \cdot T}{P_{ar} \cdot M_{ar}} \quad (1.19)$$

Finalmente, tem-se:

$$v_e = \frac{R \cdot T}{(P_{atm} - P_v) M_{ar}} \quad (1.20)$$

Entalpia específica(h): Quantidade de energia na forma de calor contida na mistura ar seco-vapor de água por unidade de massa de ar seco, para temperaturas superiores a uma determinada temperatura de referência (0°C).

A entalpia do ar pode ser calculada pela equação dada a seguir.

$$h_{\text{ar}} = c_{\text{par}} (T - T_0) \quad (1.21)$$

em que:

h_{ar} - Entalpia específica do ar seco, (kJ·kg⁻¹);

c_{par} - Calor específico do ar, (kJ·kg⁻¹·K⁻¹);

T - Temperatura, (K);

T_0 - Temperatura de referência, (K).

A entalpia do vapor de água é determinada por meio da equação:

$$h_v = h_{g,0} + c_{pv} (T - T_0) \quad (1.22)$$

em que:

h_v - Entalpia específica do vapor de água, (kJ·kg⁻¹);

$h_{g,0}$ - Entalpia específica de vaporização da água, (kJ·kg⁻¹);

c_{pv} - Calor específico do vapor de água, (kJ·kg⁻¹·K⁻¹).

A entalpia total da mistura ar seco-vapor de água é dada por:

$$h = h_{\text{ar}} + R_m \cdot h_v \quad (1.23)$$

Portanto, tem-se:

$$h = c_{\text{par}} (T - T_0) + R_m [h_{g,0} + c_{pv} (T - T_0)] \quad (1.24)$$

Em condições normais de temperatura e pressão podem ser aceitos os seguintes valores para o calor específico do ar, calor específico do vapor de água e entalpia de vaporização da água:

$$c_{\text{par}} = 1,0069254 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{\text{pv}} = 1,8756864 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$h_{\text{g},0} = 2,502535259 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

1-4. Conceitos de Fenômenos de Transporte

1-4.1. Meio contínuo (para fluidos e meios porosos)

No estudo da mecânica dos fluidos, freqüentemente, trabalha-se com expressões matemáticas que foram deduzidas com o emprego do cálculo diferencial e integral, trabalhando com dimensões infinitesimais, tais como comprimento (dx), área (da) e volume (dv). Estas dimensões devem impor as características básicas do fluido para que possa ser bem representado.

A natureza molecular dos fluidos não pode ser seguramente definida, a não ser que se utilizem equipamentos especializados para identificá-la. Essa estrutura é tal que a massa não está distribuída de forma contínua no espaço, mas está concentrada em moléculas que, por sua vez, estão separadas por regiões relativamente grandes de espaço vazio (Fox et al., 2006). Desta forma, surge a dificuldade de se aplicar o cálculo diferencial e integral a um fluido, tendo em vista que esta matéria tem estrutura descontínua, sendo caracterizada pela presença de vazios em seu interior. Portanto, em se tratando de volume infinitesimal de uma dada matéria fluida, suas propriedades não representarão as propriedades do fluido como um todo.

Devido a esta natureza descontínua dos fluidos, é adotada a hipótese do contínuo, assim cada ponto no espaço corresponde a um ponto do fluido, considerando as propriedades como massa específica, temperatura, velocidade e outras como funções contínuas da posição e do tempo. Não há vazio no interior do fluido e despreza-se a mobilidade das moléculas e os espaços intermoleculares.

A hipótese do contínuo pode ser aplicada sempre que, por menor que seja, o volume de fluido, ainda contenha número significativo de moléculas, e é válida no tratamento do comportamento dos fluidos sob condições normais. A hipótese do contínuo não se aplica quando o caminho livre molecular (trajetória

média livre das moléculas) for de mesma ordem de grandeza que a menor dimensão significativa envolvida no problema. O caminho livre molecular é definido como a distância percorrida pelas moléculas antes que se choquem ou que colidam com as paredes do recipiente.

A hipótese do contínuo também não se aplica em escoamento de gases rarefeitos, escoamento hipersônico e tecnologia de alto vácuo, em que são empregados estudos microscópicos utilizando a teoria cinética molecular.

1-4.2. Transporte em estado permanente ou estacionário

Muitos processos reais são caracterizados como processos independentes do tempo do início de sua observação. Isto significa que, se esse processo for dividido em uma série de intervalos de tempo, as várias seções do processo exibirão essencialmente as mesmas propriedades estatísticas, caracterizando assim esse processo como estacionário (Haykin, 2004). Caso contrário, será considerado transiente.

1-4.3. Transporte em estado transiente ou não estacionário

Os problemas transientes, ou de propagação, envolvem a variação temporal das grandezas físicas de interesse. A partir dos valores iniciais dessas grandezas em certo tempo, t_0 , quando não se dispõe da solução analítica, os novos valores são calculados em sucessivos intervalos de tempo Δt , até que seja alcançado o instante de tempo final, t_f .

A solução do problema é obtida caminhando-se na direção temporal em incrementos de tempo Δt , desde t_0 até t_f . Assim problemas transientes são também denominados problemas de marcha. Com a solução de problemas transientes, busca-se a evolução temporal efetiva da grandeza física. Para que esta evolução seja representativa do problema estudado, são necessárias condições iniciais fisicamente corretas (Fortuna, 2000).

1-4.4. Transporte difusivo

Entre os dois fenômenos físicos que envolvem o transporte molecular, o transporte por difusão é provido pelo movimento aleatório das moléculas que geram energia térmica, sendo transferido por colisões moleculares. Muitas colisões entre as moléculas ocorrem em um intervalo de tempo de um segundo. Estes movimentos aleatórios dão origem à difusão que ocorre em gases, soluções líquidas, em membranas e em espaços intergranulares. A velocidade à qual uma molécula difunde em um fluido ou em um meio depende de seu tamanho, forma, temperatura e da viscosidade do fluido, que são propriedades que refletem na resistência ao fluxo (Truskey et al., 2004).

Exemplos de movimentos aleatórios podem ser macroscopicamente observados entre dois fluidos, pela propagação de uma gotícula de tinta ao ser adicionada em água com pouca profundidade, de forma que a gotícula de tinta atinja o fundo rapidamente. Inicialmente, as moléculas de tinta ficam unidas no local de aplicação. Com o tempo, as extremidades da gotícula ficam mais claras, surgem os gradientes de cor e a intensidade diminui com o distanciamento do ponto de aplicação da tinta (Lee et al., 2004). Eventualmente, toda a água tem a cor lânguida de tinta e a gradação em cor não pode mais ser vista.

Uma consequência macroscópica desses movimentos aleatórios é o fenômeno da difusão das moléculas, que se movem da região mais concentrada para a região menos concentrada. A quantidade de moléculas que se movem por unidade de área em uma determinada direção é conhecido como fluxo. O fluxo é definido para toda quantidade transportada. Fluxos podem ser definidos para energia, incluindo calor, massa e quantidade de movimento. O fluxo de difusão é proporcional ao gradiente da concentração.

A relação entre o fluxo de difusão e gradiente de concentração foi, primeiramente, quantificado por Adolf Fick em 1955, sendo conhecido como *Primeira Lei de Fick* (Tyrrell, 1964). Essa lei é amplamente usada em estudos de difusão por diluição. Fick desenvolveu estas relações de forma empírica e pela analogia com a Lei de Fourier de condução de calor, indicando que o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura (Denny Kamaruddin & Koros, 1997).

O valor que relaciona o fluxo de difusão ao gradiente de concentração é o coeficiente de difusão binária, D_{ij} , em que o índice i refere-se ao soluto e j ao solvente. O coeficiente de difusão é função da temperatura e da pressão. A extensão do coeficiente de difusão depende do soluto e do meio no qual ocorre difusão, como exemplificado na Tabela 1.10.

Tabela 1.10 - Valores para coeficientes de difusão binária, D_{ij} , em condições de temperatura ambiente

Material difundido	Coeficiente de difusão ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Gases em gases	0,1 a 0,5
Gases em líquidos	$1 \cdot 10^{-7}$ a $7 \cdot 10^{-5}$
Moléculas pequenas em líquidos	$1 \cdot 10^{-5}$
Proteínas em líquidos	$1 \cdot 10^{-7}$ a $7 \cdot 10^{-7}$
Lipídios em membranas lipídicas	$1 \cdot 10^{-9}$
Proteínas em membranas lipídicas	$1 \cdot 10^{-10}$ a $1 \cdot 10^{-12}$

O coeficiente de difusão, D_{ij} , determinado por Albert Einstein (Truskey et al., 2004), é definido pela média dos quadrados das distâncias durante um movimento aleatório das moléculas. Para um movimento aleatório em duas dimensões (x e y), D_{ij} pode ser calculado utilizando a Equação (1.25).

$$D_{ij} = \frac{\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle}{4 \cdot t} \quad (1.25)$$

Em curta distância, a difusão pode ser rápida. Mas, aumentando-se as distâncias, o tempo de difusão aumenta com o quadrado da distância, tornando, assim, a difusão cada vez menos eficiente.

A difusão está associada ao transporte de massa, que ocorre em um sistema quando nele existe gradiente de concentração. Pode-se manifestar de diversas formas, assim como uma gotícula de tinta que se dilui na água ou o odor de um perfume que se espalha por uma sala, a difusão ocorre no interior de sólidos, líquidos e gases.

1-4.5. Transporte convectivo

É um mecanismo de transporte resultante da movimentação global do fluido, sendo um movimento induzido por gradientes térmicos, eliminando os limites impostos pela difusão. A convecção é um mecanismo de transporte que resulta do movimento macroscópico de fluidos. O escoamento de alguns fluidos como gases e líquidos ocorre sob a ação da força da gravidade, pressão ou forças de cisalhamento.

A aplicação de uma força em uma superfície é caracterizada em termo de tensão. A quantidade de tensão depende da magnitude da força aplicada, da direção dessa força e da superfície sobre a qual é aplicada. Tensões de cisalhamento resultam de forças aplicadas tangencialmente à superfície e tendem a modificar a forma do corpo tensionado, causando deslizamento entre as partes adjuntas. A tensão normal atua perpendicularmente à superfície, como compressão ou como tração e tende a modificar o volume do corpo tensionado.

A pressão que ajuda a promover o escoamento de um fluido através de um sistema é um exemplo de tensão normal compressiva. A aplicação de tensão de cisalhamento e diferença de pressão resulta em movimentação de fluidos. Se a movimentação do fluido for lenta em relação à difusão, então a difusão será dominante, em contrapartida, se o movimento do fluido for rápido com relação à difusão, o movimento macroscópico do fluido será a forma dominante de transporte.

A viscosidade dinâmica de um fluido, μ , é uma medida da resistência do fluido ao escoamento. Para um líquido puro, a viscosidade é uma função termodinâmica da temperatura e da pressão.

A massa específica é uma propriedade material que caracteriza o quão perto as moléculas estão arranjadas umas com relação às outras. Fisicamente, massa específica é a razão entre a massa e o volume do mesmo sistema. O volume específico de um fluido puro é uma função termodinâmica da temperatura e da pressão (Dantas Júnior et al., 2007). Em geral, os sólidos são mais densos que os líquidos e, por sua vez, líquidos são mais densos que gases. Para misturas, a massa específica é uma função da temperatura, da pressão e da composição.

A razão entre a viscosidade dinâmica e massa específica é a viscosidade cinemática, Equação (1.26), que representa uma média da eficiência de transferência de quantidade de movimento de um fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.26)$$

em que:

- ν - Viscosidade cinemática, ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);
- μ - Viscosidade dinâmica, ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$);
- ρ - Massa específica, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Como apresentado na Tabela 1.11, os gases possuem viscosidade relativamente baixa e os líquidos são mais viscosos e densos, devido à presença de forças intermoleculares.

Tabela 1.11 – Viscosidade dinâmica (μ), massa específica (ρ) e viscosidade cinemática (ν), em condições de temperatura ambiente, para alguns fluidos

Tipo de fluido	μ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Gases	10^{-4}	0,001	0,1
Água líquida	0,01	1	0,01
Glicerol líquido	10	1	10

Fonte: (Truskey et al., 2004).

Uma visão conceitual do movimento de um fluido é que a força aplicada transfere a ele quantidade de movimento. A viscosidade cinemática é análoga ao coeficiente de difusão, apresentando as mesmas unidades ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), caracterizando a difusão da quantidade de movimento.

Existe uma analogia entre transferência de calor, massa e quantidade de movimento, que pode ser genericamente representada da seguinte forma:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Fluxo da Quantidade} \\ \text{Sendo Transferida} \end{array} \right) \propto - \left(\begin{array}{c} \text{Gradiente da Quantidade} \\ \text{Sendo Transferida} \end{array} \right)$$

As relações para quantidade de movimento, calor e massa podem ser expressas pelas relações entre fluxos e gradientes para transporte, conforme apresentado na Tabela 1.12.

Tabela 1.12 – Relações entre fluxos e gradientes para transporte

Mecanismo de Transporte	Fluxo	Gradiente	Coefficiente de Proporcionalidade
Quantidade de Movimento	Tensão de Cisalhamento	Velocidade	Viscosidade
Massa	Massa ou Fluxo Molar	Concentração	Coefficiente de difusão
Calor	Calor	Temperatura	Condutividade Térmica

Fonte: (Truskey et al., 2004).

Quando é removida a força aplicada a um fluido em movimento, é decorrido um tempo antes que o movimento desse fluido cesse. Este período de desaceleração é devido à inércia do fluido. Esta variação na velocidade se ocorre devido ao balanço entre as forças viscosas que agem em oposição ao movimento, e as forças de inércia que agem a favor do movimento. As forças de inércia agem sobre o fluido, causando aceleração ou desaceleração, ao passo que as forças viscosas surgem da resistência por fricção proporcionada pelo fluido.

As forças viscosas são sensíveis à viscosidade e à inércia, e dependem da massa. Assim, as contribuições relativas dessas forças variam entre fluidos distintos.

O número de Reynolds é um grupo adimensional conhecido que descreve a razão entre forças inerciais e forças viscosas, definido pela Equação (1.27).

$$\text{Re} = \frac{\frac{\rho \cdot v^2}{L}}{\frac{\mu \cdot v}{L^2}} = \frac{\rho \cdot L \cdot v}{\mu} \quad (1.27)$$

em que:

- L - Comprimento característico, (m);
- v - Velocidade característica do escoamento, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Fazendo uma analogia entre transferência de calor, massa e quantidade de movimento, o número de Reynolds representa também a razão de transferência de quantidade de movimento por advecção e a transferência de quantidade de movimento por difusão viscosa.

Uma característica de fluidos em movimento é a mudança drástica do número de Reynolds acima de um valor crítico, que caracteriza o escoamento como laminar ou turbulento. No regime laminar, o escoamento é descrito pelo movimento em lâminas ou camadas, não havendo misturas macroscópicas entre as camadas de fluido adjacentes.

O regime de escoamento turbulento caracteriza-se pelo movimento tridimensional aleatório das partículas do fluido sobreposto ao movimento médio do fluido. Análises de escoamento em regime turbulento são mais complexas que em escoamento em regime laminar. Os escoamentos podem ser classificados como não-viscoso (os efeitos de viscosidade são desprezados, considerando-se como nula a viscosidade do fluido), e escoamento viscoso (os efeitos de viscosidade são determinantes da natureza do escoamento, e não podem ser desprezados).

A velocidade média de um fluido em movimento através de um meio poroso é proporcional à variação da queda de pressão com a distância percorrida pelo fluido. Esta relação constitutiva é conhecida como Lei de Darcy, que será discutida mais adiante.

1-4.6. *Lei de Fourier*

O fluxo de calor por condução, segundo a lei de Fourier, é dado por meio do produto da condutividade térmica pelo gradiente de temperatura. Este representa a variação da temperatura por unidade de comprimento. A transferência de calor por condução é uma medida vetorial, sendo a equação

básica de Fourier para o fluxo de calor expressa da seguinte forma (Kays et al., 2005):

$$\dot{q} = -k \cdot \nabla T \quad (1.28)$$

em que:

\dot{q} - Fluxo de calor, ($W \cdot m^{-2}$);

k - Condutividade térmica do meio condutor, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

1-4.7. Primeira Lei de Fick

A expressão que relaciona o fluxo de material ao gradiente de concentração é referida como a equação da primeira lei de Fick (Tyrrell, 1964).

$$J = -D \left(\frac{dc}{dx} \right) \quad (1.29)$$

em que:

J - Fluxo de um componente através de plano de área unitária, ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$);

c - Concentração do componente, ($mol \cdot m^{-3}$);

D - Coeficiente de difusão (ou difusividade), ($m^2 \cdot s^{-1}$);

x - Distância percorrida pelo fluxo, (m).

O sinal negativo na equação indica que o fluxo está na direção do decréscimo de concentração. A equação da primeira lei de Fick descreve o processo de difusão sob condições de equilíbrio estacionário (gradiente de concentração não varia com o tempo).

1-4.8. Segunda Lei de Fick

A segunda lei de Fick estabelece que a velocidade de mudança de concentração em um elemento de volume interno ao campo difusional é proporcional à velocidade de mudança no gradiente de concentração, naquele ponto do campo. A constante de proporcionalidade é o coeficiente de difusão

ou difusividade, D . Em muitos métodos experimentais usados para estudar difusão é de interesse a variação de concentração (c) com o tempo (t) e com a distância. Nesses casos, a equação da primeira lei de Fick pode ser convertida em uma equação diferencial parcial de segunda ordem. Assim, a forma geral da equação para vetores difusionais é (Zhang et al., 2011):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (1.30)$$

Em notação vetorial tem-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D(\nabla^2 c) \quad (1.31)$$

1-4.9. Escoamento incompressível

As duas questões importantes que devem ser observadas antes de analisar um escoamento de fluido são saber se um escoamento é viscoso ou não e se um escoamento é compressível ou não.

No escoamento incompressível, as variações na massa específica são desprezíveis. Geralmente, o escoamento de um líquido pode ser tratado como incompressível e, para muitos outros líquidos, a temperatura tem pouca influência sobre a massa específica. Sobre pressões moderadas, os líquidos podem ser considerados incompressíveis (Fox et al., 2006).

Os escoamentos de gases com transferência de calor desprezível também podem ser considerados incompressíveis, se as velocidades do escoamento forem pequenas em relação à velocidade do som. Dessa forma, para gases, o Número de Mach define a relação entre a velocidade do escoamento, v , e a velocidade local do som, c_s .

$$M_{ach} \equiv \frac{v}{c_s} \quad (1.32)$$

Em geral, os escoamentos que ocorrem a uma velocidade menor que um terço da velocidade do som ($M_{ach} < 0,3$) podem ser tratados como incompressíveis.

1-4.10. Escoamento não viscoso

No escoamento de fluidos não viscosos a viscosidade dinâmica, μ , é supostamente nula e em alguns casos a hipótese de $\mu = 0$ simplifica a análise conduzindo a resultados satisfatórios.

1-4.11. Escoamento irrotacional

Uma partícula de fluido movendo-se em um campo de escoamento genérico tridimensional pode girar em relação a todos os três eixos de coordenadas. Portanto, a rotação de uma partícula é uma quantidade vetorial e, em geral, $\vec{\omega} = \hat{i}\omega_x + \hat{j}\omega_y + \hat{k}\omega_z$, em que ω_x é a rotação no eixo x, ω_y é a rotação no eixo y e ω_z é a rotação no eixo z. Se o fluido iniciar o seu movimento a partir do repouso, onde a vorticidade é nula em todo o espaço, e se a vorticidade for nula nas fronteiras, então a vorticidade irá manter-se nula ao longo do tempo em todo o escoamento (Rodriguez Azara & Emanuel, 1988).

O escoamento de fluido perfeito, em que a vorticidade é nula em todo o espaço, $\vec{\omega} = 0$, é definido como escoamento irrotacional (Fox et al., 2006):

$$\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} = \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0 \quad (1.33)$$

em que:

$$v_x, v_y, v_z \quad - \quad \text{Velocidade nas direções } x, y, z, \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}).$$

Em coordenadas cilíndricas, a condição de irrotacionalidade requer que:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{\partial v_\theta}{\partial z} = \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} = 0 \quad (1.34)$$

em que:

$$r, \theta, z \quad - \quad \text{Coordenadas cilíndricas;}$$

$$v_r, v_\theta, v_z \quad - \quad \text{Velocidade nas coordenadas } r, \theta, z, \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

As únicas tensões que geram vorticidade são as tensões de cisalhamento, portanto, escoamentos invíscitos, em que as tensões de cisalhamento são iguais a zero, são irrotacionais.

1-4.12. Lei de Darcy

A teoria de escoamento laminar mostra que o processo é lento em meio poroso homogêneo, baseada no experimento clássico originalmente desenvolvido por Darcy (1856). Um desenho esquemático do experimento de Darcy é mostrado na Figura 1.3, em que um filtro homogêneo de altura h é limitado por seções planas de mesma área superficial A . O filtro é preenchido com um líquido incompressível. Manômetros abertos são colocados para medir a pressão nos pontos inferiores e superior do filtro, fornecendo as alturas h_1 e h_2 , respectivamente. Pela variação das várias quantidades envolvidas, Darcy deduziu a seguinte relação:

$$Q = -K \cdot A \left(\frac{h_2 - h_1}{h} \right) \quad (1.35)$$

em que:

- Q - Volume total de fluido que atravessa o filtro por unidade de tempo, ($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$);
- K - Constante que depende das propriedades do fluido e do meio poroso, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
- A - Área das seções planas do filtro, (m^2);
- $h_2 - h_1$ - Diferença de altura manométrica, (m);
- h - Altura do filtro, (m).

A Equação (1.35) é conhecida como Lei de Darcy. O sinal negativo na expressão indica que o escoamento é na direção oposta à pressão crescente.

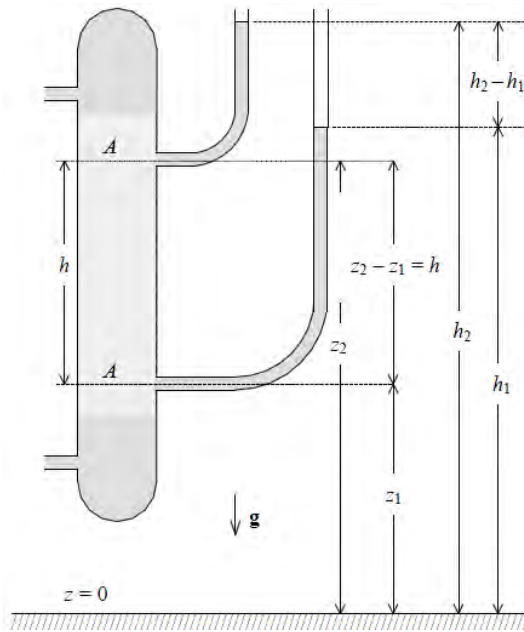


Figura 1.3 - Esquema do experimento de filtração de Darcy.

A lei de Darcy pode ser reescrita em função da pressão, P , e da massa específica, ρ , do fluido. No ponto superior do filtro, com elevação z_2 , a pressão é $P_2 = \rho \cdot g(h_2 - z_2)$, e no ponto inferior com elevação z_1 , a pressão é $P_1 = \rho \cdot g(h_1 - z_1)$. Como $z_2 - z_1 = h$, aplicando a Equação (1.35) obtém:

$$Q = -K \cdot A \left[\left(\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g \cdot h} \right) + 1 \right] \quad (1.36)$$

Supondo ρ e g constantes, define-se uma nova constante:

$$K' = \frac{K}{\rho \cdot g} \quad (1.37)$$

Então, a Equação (1.30) é reescrita como:

$$Q = -K' \cdot A \left(\frac{P_2 - P_1 + \rho \cdot g \cdot h}{h} \right) \quad (1.38)$$

A constante K' depende tanto das características geométricas do meio poroso quanto das propriedades físicas do fluido em questão. Assim, esta constante pode ser definida da seguinte forma:

$$K' = \frac{\kappa}{\mu} \quad (1.39)$$

O parâmetro κ é a permeabilidade específica do meio poroso (dado em m^2). A velocidade média pode ser definida por:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} \quad (1.40)$$

Daí, a lei de Darcy pode ser reescrita como:

$$\bar{v} = -\left(\frac{\kappa}{\mu}\right)\left(\frac{P_2 - P_1 + \rho \cdot g \cdot h}{h}\right) \quad (1.41)$$

Essa equação pode ser generalizada na forma diferencial, fazendo-se h tender a zero.

$$v = -\frac{\kappa}{\mu}(\nabla P - \rho \cdot g) \quad (1.42)$$

Aqui, g é um vetor na direção da aceleração da gravidade e com a magnitude da aceleração da gravidade. Quando os efeitos gravitacionais não são relevantes, chega-se à seguinte equação:

$$v = -\frac{\kappa}{\mu} \cdot \nabla P \quad (1.43)$$

1-4.13. Porosidade

É uma propriedade importante dos materiais, pois mede a sua capacidade de armazenamento de fluidos e está relacionada com o volume, sendo definida como o volume vazio em relação ao volume total ocupado pelo material e, portanto, representa o percentual de poros no meio poroso, não necessariamente interligados (Coutinho, 2005; Nield & Bejan, 2006).

Quando porções de espaços vazios estiverem interconectadas umas às outras, estes espaços são denominados de espaços vazios efetivos ou porosidade efetiva. Quanto maior for o índice de espaços vazio, maior será a porosidade e vice-versa (Fernandes, 2006). Um meio poroso é uma porção de espaço ocupada por matéria heterogênea ou multifásica, sendo pelo menos uma dessas fases não sólida.

Genericamente, a porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de espaços vazios, V_v , existentes no material poroso e o volume total ocupado pelo material, V_m .

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_m} \quad (1.44)$$

1-4.14. Permeabilidade

Representada por κ , a permeabilidade de um material está ligada à porosidade e descreve a facilidade com que um fluido newtoniano sob pressão circula através do meio poroso (Begonha, 2001). A condutividade de um fluido é definida pela capacidade de se deixar atravessar em um meio, indicando a maior ou menor facilidade que o material possui de percolar o fluido no seu interior. Dessa forma, um material é bem permeável quando os fluidos se deslocam com facilidade, e pouco permeável quando ocorre o contrário (Ortega et al., 2002).

O movimento de um fluido só é possível através dos poros interconectados. O fluxo de um fluido em um meio poroso é expresso pela lei de Darcy, que define a vazão de um fluido através de um meio permeável e varia diretamente proporcional à pressão aplicada, e inversamente proporcional à viscosidade do fluido. Dessa forma, a intensidade do fluxo aumenta à medida que se exerce mais pressão ou diminui a viscosidade.

A porosidade e a permeabilidade, apesar de relacionadas, não são sinônimas, pois pode haver casos de materiais em que, depois de saturados, tornam-se praticamente impermeáveis. Assim, não existe uma conexão direta entre a porosidade e a permeabilidade, embora materiais com alta porosidade sejam, em geral, muito permeáveis, e isso se deve ao número de poros interligados.

1-4.15. Tortuosidade

O fator estrutural, ou tortuosidade, é um parâmetro para predição da propagação sonora em materiais porosos e foi introduzido, inicialmente, por Zwikker & Kosten (1949).

Em duas dimensões a tortuosidade pode ser definida como a relação entre o comprimento efetivo de uma curva com a distância entre as suas terminações (Jorgensen et al., 2011).

$$\tau = \frac{L_{ef}}{L_t} \quad (1.45)$$

em que:

- τ - Tortuosidade, (adimensional);
- L_{ef} - Comprimento efetivo, (m);
- L_t - Distância entre as terminações da curva, (m).

A tortuosidade é uma medida do desvio do eixo axial dos poros da direção de propagação da onda através da seção transversal dos poros do material poroso não uniforme, ao longo do seu comprimento.

A tortuosidade é devida a dois fatores: mudança da direção do fluxo e, como consequência, da aceleração do fluido. À medida que o fluido é restringido ao longo do caminho de poros tortuosos, ele produz uma força que age contra as paredes da estrutura, que por sua vez, produz uma força de reação correspondente.

As forças de interação viscosas contêm um componente resistivo quantificado em termos de resistividade do fluxo, e uma reativa, em termos de massa específica equivalente. Então, corre um aumento na energia cinética do fluxo produzido pela restrição no canal devido à viscosidade. Assim, a resistividade ao fluxo está ligada aos efeitos viscosos do escoamento, enquanto a tortuosidade é relacionada aos seus efeitos inerciais.

1-4.16. Aproximação de Boussinesq

Para satisfazer certas condições do fluxo, foi sugerido por Boussinesq em 1903, que a variação da massa específica em um fluido pode ser desconsiderada, exceto no termo de gravidade, em que ρ é multiplicada por g . Esta aproximação também trata as outras propriedades, tais como μ , κ , C_p ,

como constantes (Kundu & Cohen, 2001). A variação de pressão na corrente livre na região fora da camada-limite pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{dP_{\infty}}{dx} = -\rho_{\infty} \cdot g \quad (1.46)$$

Assim, a força de empuxo e o escoamento gerado em função da variação da massa específica, ρ , podem ser reduzidos para a seguinte expressão:

$$v_x \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = g \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + v_y \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (1.47)$$

A equação de momento pode ser escrita como:

$$v_x \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{dP_{\infty}}{dx} \right) - g + v_y \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (1.48)$$

Substituindo-se a Equação (1.46) na Equação (1.48) e fazendo as devidas simplificações obtém-se:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp_{\infty}}{dx} - g = g \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (1.49)$$

Se a variação de massa específica for somente devida à variação de temperatura, essa parcela pode ser relacionada a uma propriedade do fluido, conhecida como Coeficiente de Expansão Volumétrica Térmica, β .

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho_{\infty}}{\partial T} \right)_p \quad (1.50)$$

Essa propriedade termodinâmica do fluido fornece uma medida da variação da massa específica, em resposta a uma mudança na temperatura e pressão constante. Dessa forma pode-se escrever na forma aproximada:

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\rho_{\infty} - \rho}{T_{\infty} - T} \right) \quad (1.51)$$

Obtém-se, assim:

$$(\rho_{\infty} - \rho) \approx \rho \cdot \beta (T_{\infty} - T) \quad (1.52)$$

Essa simplificação é conhecida como Aproximação de Boussinesq (Incropera et al., 2008).

1-5. REFERÊNCIAS

- Begonha, A. J. S. d. ***Meteorização do Granito e Deterioração da Pedra em Monumentos e Edifícios da Cidade do Porto*** F. Edições (2001).
- Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Hall, C. W. ***Drying and Storage Of Grains and Oilseeds***. New York, Springer (1992).
- Brooker, D. B.; Hall, C. W.; Bakker-Arkema, F. W. ***Drying Cereal Grains***, AVI Pub. Co (1974).
- Brooker, D. B.; McKibben, J. S.; Garner, G. B. ***Packaging and Handling silage in Bags***, University of Missouri - College of Agriculture, Agricultural Experiments Station (1967).
- Corrêa, P. C.; Christ, D.; Martins, J. H.; Mantovani, B. H. M. ***Curvas de Dessorção e Calor Latente de Vaporização para as Sementes de Milho Pipoca (Zea mays)***. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (1998).
- Coutinho, J. S. ***Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem***, FEUP Edições (2005).
- Dantas Júnior, E. E.; Queiroz, A. J. M.; Figueiredo, R. M. F. ***Determinação e elaboração de modelos de predição da massa específica da manga espada***. Revista Educação Agrícola Superior - Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior- ABEAS 22(1) (2007).
- Darcy, H.; Hager, W. H. ***Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon***. Henry P.G. Darcy and other pioneers in hydraulics. G. O. Brown, J. D. Garbrecht and W. H. Hager. Dalmont, ASCE (1856).
- Denny Kamaruddin, H.; Koros, W. J. ***Some observations about the application of Fick's first law for membrane separation of multicomponent mixtures***. Journal of Membrane Science 135(2): 147-159 (1997).
- Fernandes, M. M. ***Mecânica dos Solos***. Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais. F. Edições: 450 (2006).

- Fortuna, A. d. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos**, Edusp (2000).
- Fox, R. W.; Mcdonald, A. t.; Pritchard, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro, LTC (2006).
- GEPEQ. **INTERAÇÕES E TRANSFORMAÇÕES III - LIVRO DO ALUNO : Química e Sobrevivência - Atmosfera**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo (2008).
- Haykin, S. **Sistemas de Comunicação: Analógicos e Digitais** (2004).
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro, LTC (2008).
- Jorgensen, P. S.; Hansen, K. V.; Larsen, R.; Bowen, J. R. **Geometrical characterization of interconnected phase networks in three dimensions**. Journal of Microscopy 244(1): 45-58 (2011).
- Kays, W.; Crawford, M.; Weigand, B.; Kays, W.; Crawford, M.; Weigand, B. **Convective Heat and Mass Transfer**, McGraw-Hill Science/Engineering/Math (2005).
- Kundu, P. K.; Cohen, I. M. **Fluid Mechanics**, Academic Press (2001).
- Lee, S.; Lee, H. Y.; Lee, I. F.; Tseng, C. Y. **Ink diffusion in water**. European Journal of Physics 25(2): 331-336 (2004).
- Navarro, S.; Noyes, R. T. **The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management**. Florida, CRC (2001).
- Nield, D. A.; Bejan, A. **Convection in Porous Media**. New York, Springer (2006).
- Ortega, F. S.; Innocentini, M. D. M.; Valenzuela, F. A. O.; Pandolfelli, V. C. **Efeito da técnica de aeração sobre a macroestrutura e a permeabilidade de espumas cerâmicas produzidas via "gelcasting"**. Cerâmica 48: 79-85 (2002).
- Park, K. J.; Bin, A.; Brod, F. P. R. **Obtenção das Isotermas de Sorção e Modelagem Matemática para a Pêra Bartlett (Pyrus sp) com e sem Desidratação Osmótica**. Ciência e Tecnologia de Alimentos (2001).

- Rodriguez Azara, J. L.; Emanuel, G. ***Compressible rotational flows generated by the substitution principle***. PHYS. FLUIDS 31(5 , May 1988): 1058-1068 (1988).
- Sauer, D. B. ***Storage of Cereal Grains and Their Products***. Minnesota, American Association of Cerial Chemists (1992).
- Silva, J. S. ***Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas***. Viçosa/MG, Aprenda Fácil (2000).
- Silva, L. C. d. ***Refrigeração de Produtos Armazenados***. Boletim Técnico - Departamento de Engenharia Rural: 10 (2008).
- Truskey, G. A.; Yuan, F.; Katz, D. F. ***Transport Phenomena in Biological Systems*** Prentice Hall (2004).
- Tyrrell, H. J. V. ***The origin and present status of fick's diffusion law***. Journal of Chemical Education 41(7): 397-400 (1964).
- Zhang, Z.; Li, J.; Liao, R.; Grzybowski, S. ***Moisture diffusion in vegetable oil-paper insulation*** (2011).
- Zwikker, C.; Kosten, C. W. ***Sound Absorbing Materials***, Elsevier Publishing Company (1949).

CAPÍTULO 2

MODELAGEM MATEMÁTICA

2-1. INTRODUÇÃO

A modelagem do processo de resfriamento (ou aquecimento) de grãos armazenados pode ser realizada por meio das equações de Navier-Stokes (Zienkiewicz & Taylor, 2000).

As equações de transferência de calor e massa podem ser consideradas matematicamente como as leis de conservação da mecânica dos fluidos. Quando aplicadas a um fluido contínuo, essas equações de conservação relacionam as taxas de mudança de uma propriedade do fluido a forças externas, considerando-se as seguintes leis:

- i) A lei de conservação da massa ou continuidade.
- ii) A lei de conservação da quantidade de movimento ou momentum.
- iii) A lei de conservação da energia ou primeira lei da termodinâmica.

Neste trabalho interessam, em particular, o movimento de ar através da massa de grãos armazenada e suas interações com o produto, descritas pelas equações de conservação para meios porosos.

A modelagem do comportamento da transferência simultânea de calor e massa em grãos armazenados (meio poroso) leva em consideração as seguintes suposições:

- i) Os materiais são homogêneos, isotrópicos e não deformáveis.
- ii) Os efeitos devidos à aceleração da gravidade são desprezíveis.
- iii) O comportamento do teor de água pode ser descrito por meio de uma equação para o teor de água total, ou seja, a soma da equação da continuidade para as fases líquida e de vapor.

Com base nessas suposições, as equações matemáticas que descrevem a transferência acoplada de calor e massa em um meio poroso foram desenvolvidas a partir das equações de Navier-Stokes.

O problema proposto é em regime transiente e leva em consideração a dependência das propriedades do material com a temperatura. A solução do problema envolve a análise de fluxo de ar, a transferência de calor e de massa, na massa de grãos armazenados. Essa análise resulta em equações que descrevem o comportamento da velocidade do ar, da temperatura e da umidade do ar, e da temperatura e do teor de água do grão. A seguir, são apresentados os modelos que serão utilizados nesse trabalho.

2-1.1. Equações para o fluxo de ar

A taxa de fluxo de ar é derivada a partir da equação da quantidade de movimento (Kaviany, 1995). Depois de efetuadas as simplificações necessárias, a taxa de fluxo de ar pode ser expressa pela seguinte equação (Coelho, 2009):

$$0 = -\nabla P - \vec{m} \quad (2.1)$$

em que:

\vec{m} - Força resistiva resultante da interação entre o fluido e o meio, $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$.

∇P - Gradiente de pressão, $(\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$.

A força resistiva pode ser calculada pela expressão (Massarani, 1999):

$$\vec{m} = \left(\frac{\mu}{\kappa} \right) \vec{v} + \left(\frac{c_f \cdot \rho_a}{\sqrt{\kappa}} \right) \cdot |\vec{v}| \cdot \vec{v} \quad (2.2)$$

em que:

μ - Viscosidade, $(\text{Pa} \cdot \text{s})$;

κ - Permeabilidade do meio, (m^2) ;

\vec{v} - Vetor velocidade, $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$;

c_f - Coeficiente de forma, (adimensional);

ρ_a - Massa específica do ar, $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$.

A permeabilidade, κ , e o coeficiente de forma, c_f , foram apresentados detalhadamente por (Coelho, 2009) e são descritos pelas equações a seguir.

$$\kappa = \frac{d_p^2 \cdot \varepsilon^2}{2 \cdot k_1 (1 - \varepsilon)^2} \quad (2.3)$$

$$c_f = \left(\frac{\sqrt{k_1}}{2 \cdot k_2} \right) \left(\frac{1}{\varepsilon^{1.5}} \right) \quad (2.4)$$

em que:

k_1, k_2 - Constantes que dependem do produto, (adimensional);

d_p - Diâmetro equivalente da partícula, (m);

ε - Porosidade do meio, (adimensional).

O diâmetro equivalente da partícula é determinado empiricamente de acordo com metodologia apresentada por Li e Sokhansanj (1994), conforme citado por Coelho (2009).

Valores de k_1 , k_2 e d_p para grãos de milho e de soja são apresentados na Tabela 2.1 (Coelho, 2009).

Tabela 2.1 - Valores de k_1 , k_2 e d_p para grãos de milho e de soja

Produto	k_1	k_2	d_p (mm)
Soja	113,2	1,628	5,84
Milho	191,2	2,176	7,36

No caso de escoamento de fluido em meio poroso, o vetor gradiente de pressão (∇P) e o vetor velocidade (\vec{v}) são paralelos e possuem direções opostas.

$$\vec{v} = -k \cdot \nabla P \quad (2.5)$$

Pela equação da continuidade tem-se:

$$\nabla \cdot (\rho_a \vec{v}) = 0 \quad (2.6)$$

Substituindo-se a Equação (2.6) na Equação (2.5) obtém-se:

$$\nabla \cdot (\rho_a k \nabla P) = 0 \quad (2.7)$$

O parâmetro k é dado pela seguinte expressão:

$$k = A \cdot |\nabla P|^{(B-1)} \quad (2.8)$$

A Tabela 2.2 contém valores de A e B para grãos de milho.

Tabela 2.2 - Valores de A e B para grãos de milho (Brooker et al., 1974)

Gradiente de pressão ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	A ($\times 10^{-3}$)	B
0,000 – 8,175	1,451	0,950
8,175 – 20,438	1,713	0,867
20,438 – 57,225	2,197	0,768
57,225 – 163,500	3,017	0,702
163,500 – ...	4,443	0,628
4,088 – 899,250	3,294*	0,680*

* Valores médios apresentados por Brooker et al. (1974)

2-1.2. Equações para transferência de calor e massa

Os balanços de energia e de massa são realizados em um volume de controle diferencial (Figura 2.1) localizado em uma posição arbitrária na massa de grãos armazenada, levando-se em consideração as suposições descritas anteriormente.

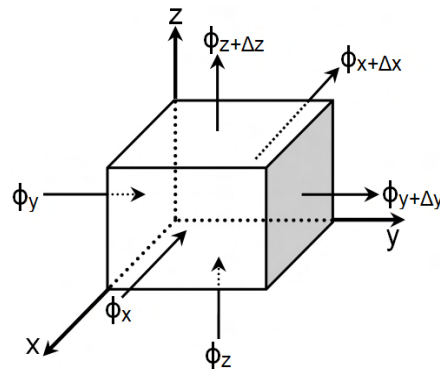


Figura 2.1. Volume de controle diferencial.

A porosidade e a área específica (área por unidade de volume) dos grãos são assumidas como sendo constantes. O volume de controle mostrado na Figura 2.1 engloba tanto os grãos quanto o ar.

A análise dos balanços de calor e de massa no volume de controle mostrado na Figura 2.1 resulta nas seguintes equações:

$$\frac{\partial(\rho_a \cdot W)}{\partial t} + \nabla \left(\rho_a \cdot \frac{\vec{v}}{\varepsilon} \cdot W \right) = - \left(\frac{\rho_g}{\varepsilon} \right) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial(\rho_a \cdot T)}{\partial t} + \nabla \left(\rho_a \cdot \frac{\vec{v}}{\varepsilon} \cdot T \right) = - \frac{h_c \cdot a(T - \theta)}{\varepsilon(c_a + c_v \cdot W)} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \cdot \theta)}{\partial t} = - \frac{h_c \cdot a(T - \theta)}{c_g + c_w \cdot M} + \rho_g \left[\frac{h_{fg} + c_v(T - \theta)}{c_g + c_w \cdot M} \right] \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2.11)$$

em que:

- W - Razão de umidade do ar, $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$;
- M - Teor de água dos grãos, base seca, decimal.
- T - Temperatura do ar, (K);
- θ - Temperatura do grão, (K)
- t - Tempo, (s);
- ε - Porosidade da massa de grãos, decimal;
- ρ_g - Massa específica do grão, $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$;
- c_a - Calor específico do ar, $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$;
- c_v - Calor específico do vapor de água, $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$;
- c_g - Calor específico do grão, $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$;
- c_w - Calor específico da água, $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$;
- h_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$;
- h_{fg} - Calor de evaporação da água, $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$.

2-1.3. Equações para taxa de secagem

A variação do teor de água dos grãos é descrita por uma equação de secagem em camada fina. Neste trabalho, foi utilizada a equação de Page na forma diferencial (Martins, 1988):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\alpha \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} (M - M_e) \quad (2.12)$$

em que:

M_e - Teor de água de equilíbrio dos grãos, base seca, decimal;

α, β - Parâmetros que dependem do produto, adimensional.

Os parâmetros α e β foram determinados por Li e Morey (1984) em função da temperatura do ar, T , e do teor de água inicial, M_o , para grãos de milho:

$$\alpha = 1,91 \cdot 10^{-2} + 2,767 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 7,286 \cdot 10^{-6} \cdot T \cdot M_o \quad (2.13)$$

$$\beta = 0,5375 + 1,141 \cdot 10^{-5} \cdot M_o^2 + 5,183 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad (2.14)$$

2-1.4. Propriedades físicas de grãos de milho

O teor de água de equilíbrio foi calculado utilizando-se a equação de Henderson modificada, segundo recomendação da American Society of Agricultural Engineers (Martins, 1988):

$$M_e = \left[\frac{\ln(1 - U_r)}{-8,6541(T + 49,810)} \right]^{1/1,8634} \quad (2.15)$$

em que:

U_r - Umidade relativa do ar intergranular, decimal.

O calor latente de evaporação da água do grão de milho foi estimado pela seguinte expressão (França et al., 1994):

$$h_{fg} = 3638548 - 4000720 \cdot M - 3529,08 \cdot T \quad (2.16)$$

O calor específico de grãos de milho pode ser estimado pela equação (Andrade et al., 2004):

$$c_g = 1132,7 + 5445,3 \left(\frac{M}{1+M} \right) \quad (2.17)$$

A massa específica de grãos de milho pode ser estimada pela equação (Andrade et al., 2004):

$$\rho_g = 702,76 + 595,71 \left(\frac{M}{1+M} \right) - 3434 \left(\frac{M}{1+M} \right)^2 \quad (2.18)$$

A porosidade da massa de grãos e a área específica média (área superficial do grão por unidade de volume) foram assumidas como sendo constantes (Bakker-Arkema et al., 1978; França et al., 1994):

$$\varepsilon = 0,44 \quad (2.19)$$

$$a = 784 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.20)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção foi calculado utilizando as seguintes equações (Bakker-Arkema et al., 1978):

$$h_c = A \cdot c_a \cdot Q_a \left(\frac{2 \cdot r_o \cdot Q_a}{\mu_a} \right)^B \quad (2.21)$$

$$\mu_a = C + D \cdot T \quad (2.22)$$

em que:

h_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$;

A,B,C,D - Constantes (Tabela 2.3);

r_o - Raio da partícula equivalente, (m);

c_a - Calor específico do ar, $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$;

Q_a - Taxa de fluxo de ar, $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$;

μ_a - Viscosidade do ar, $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$;

T - Temperatura do ar, (K).

Tabela 2.3 - Constantes para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção para grãos (Brooker et al., 1974)

A	B	C	D
0,2755	-0,34	0,06175	0,000165

2-2. MODELOS COMPUTACIONAIS E APLICAÇÕES UTILIZANDO A MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A implementação de técnicas numéricas para solução do problema de secagem de grãos tem sido realizada por meio de programas computacionais (Martinovic et al., 2001; Boonen et al., 2002; Jia et al., 2002). Como o processo de resfriamento de grãos é similar ao de secagem, foram utilizadas neste trabalho as mesmas técnicas numéricas.

As equações de Navier-Stokes possuem limitações quando aplicadas em algumas áreas da engenharia. Isso significa que processos adicionais, com um conjunto maior de regras, podem ser necessários na dinâmica do sistema durante a simulação. Nesses casos, as equações que descrevem o processo podem ser modificadas com adições de aproximações ou modelos físicos para representar inteiramente o regime do fluxo. Com isso, importantes modelos físicos, comumente usados em aplicações de engenharia, incluem modelos de turbulência, de meios porosos e de múltiplas fases.

Muitos fenômenos observados na engenharia agrícola podem ser descritos por um sistema de equações de transporte de massa, de quantidade de movimento e de energia. Desta forma, modelos representativos de tais fenômenos podem ser implementados e resolvidos pela mecânica dos fluidos computacional.

Os métodos computacionais podem explorar a relação física existente em nível macroscópico para representar satisfatoriamente a dinâmica dos fluxos e os seus efeitos. Em meios porosos, podem-se relacionar os efeitos de partícula e da adição de fluxo de ar (Hoang et al., 2000; Verboven et al., 2001).

2-2.1. Equações de Conservação

2-2.1.1. Conservação da Massa

Uma das leis básicas de conservação para o fluxo de fluidos afirma que a massa não pode ser criada nem destruída. Essa é a base para a equação da continuidade. E pode ser representada em coordenadas cartesianas pela equação a seguir (Hirsch, 2007).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.23)$$

em que:

x, y, z - Direções das coordenadas;

v_x, v_y, v_z - Velocidades nas direções x, y, z , respectivamente.

Pode-se definir também, de forma similar, a equação de conservação de massa, adicionando-se o termo fonte ao lado direito da Equação (2.23), como apresentado na Equação (2.24).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = S_m \quad (2.24)$$

em que:

S_m - Termo fonte.

2-2.1.2. Conservação da quantidade de movimento

A equação da quantidade movimento é obtida a partir da aplicação da segunda lei de Newton de movimento. No domínio do problema, a equação da quantidade de movimento, também conhecida como a equação de Navier Stokes, se mantém constante (Tu et al., 2008).

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_{\text{Aceleração Local}} + \underbrace{v_x \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v}{\partial y}}_{\text{Termo Advectivo}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}}_{\text{Gradiente de Pressão}} + \underbrace{v \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}}_{\text{Difusão}} \quad (2.25)$$

em que

ν - Viscosidade cinemática, ($m^2 \cdot s^{-1}$).

A equação de momento pode ser descrita pela expressão a seguir.

$$\underbrace{\rho \cdot v_x \frac{\partial v}{\partial x} + \rho \cdot v_y \frac{\partial v}{\partial y}}_{\text{Inércia}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}}_{\text{Pressão}} + \underbrace{\mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)}_{\text{Atrito}} \quad (2.26)$$

2-2.1.3. Conservação da quantidade de energia

A equação para a conservação da quantidade de energia é derivada das considerações da primeira lei da termodinâmica. Essa lei estabelece que a quantidade total de energia de um sistema isolado permaneça constante (Tu et al., 2008).

$$\left(\begin{array}{c} \text{Taxa temporal} \\ \text{de variação} \\ \text{da energia} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Taxa líquida} \\ \text{de calor} \\ \text{adicionado} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Taxa líquida} \\ \text{de trabalho} \\ \text{adicionado} \end{array} \right) \quad (2.27)$$

A equação em sua forma generalizada é definida como:

$$\underbrace{v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y}}_{\text{Advecção}} = \alpha \underbrace{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)}_{\text{Difusão}} + \psi \quad (2.28)$$

em que

ψ - Dissipação viscosa, $(K \cdot s^{-1})$;

α - Difusividade térmica, $(m^2 \cdot s^{-1})$.

O termo de dissipação viscosa pode ser definido como:

$$\psi = \mu \left\{ \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (2.29)$$

2-2.2. Métodos numéricos para solução de equações diferenciais

Na dinâmica dos fluidos computacional (CFD), há vários métodos para solucionar as equações que descrevem o processo. Cada método tem seus

pontos fortes e deficiências (Maliska, 2004). A seguir são descritos alguns desses métodos e sua aplicação.

2-2.2.1. Métodos das diferenças finitas

Este método consiste em aproximar as derivadas parciais por razão incremental calculadas em uma malha constituída por um número finito de nós, introduzindo, inicialmente, uma malha computacional, conforme esquematizado na Figura 2.2.

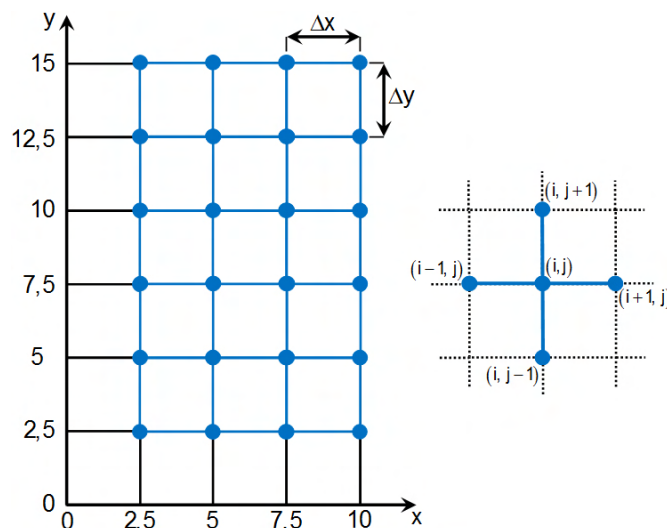


Figura 2.2 – Malha computacional para $\Delta x = \Delta y = 0,25\text{m}$ com ilustração do esquema de cinco pontos para o operador de Laplace para o problema de difusão de calor.

As aproximações por diferenças finitas baseiam-se na discretização da equação diferencial em pontos, ou nós, escolhidos onde as derivadas são substituídas por formulações, fornecendo um vetor cujas componentes convergem para os valores nodais da solução exata. Essa convergência é quadrática em relação ao passo de discretização. Baseia-se na formulação integral da equação diferencial original e supõe-se que a solução aproximada seja seccionalmente polinomial. As matrizes resultantes das aproximações por diferenças finitas e por elementos finitos são esparsas e mal condicionadas.

A discretização da equação de Laplace por meio de diferenças centrais de segunda ordem é apresentada nas Equações (2.30) a (2.37), conforme (Piskounov, 1984).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta y^2} + O(\Delta y^2) \quad (2.31)$$

Substituindo-se as derivadas parciais na equação de Laplace por suas diferenças finitas e desprezando o erro de truncamento de segunda ordem, obtém-se:

$$\frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (2.32)$$

Se for considerado $\Delta x = \Delta y$ obtém-se:

$$T_{i,j} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1}}{4} \quad (2.33)$$

Caso contrário, para $\Delta x \neq \Delta y$, tem-se:

$$T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j} + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} (T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}) = 0 \quad (2.34)$$

Para simplificar, definem-se os seguintes parâmetros:

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \beta \quad (2.35)$$

$$-2(1 + \beta^2) = \gamma \quad (2.36)$$

Substituindo esses parâmetros na equação (2.34) e rearranjando os termos, obtém-se:

$$\beta^2 T_{i,j-1} + T_{i-1,j} + \gamma T_{i,j} + T_{i+1,j} + \beta^2 T_{i,j+1} = 0 \quad (2.37)$$

A identificação do modelo e seus contornos é um importante passo para a modelagem (Xavier Jr., 2007). A fronteira é a interface entre a área do objeto a ser modelado e o ambiente que o cerca. As condições de fronteira, entretanto, devem ser especificadas para o contorno inteiro, e podem variar com o tempo.

2-2.2.2. Método do volume de controle (método dos volumes finitos)

A abordagem do método de volume de controle é especialmente utilizada para problemas onde existam interfaces entre regiões com diferentes propriedades físicas. As funções desconhecidas são representadas em termos dos valores médios sobre um conjunto de volumes finitos, onde o modelo de equações diferenciais parciais, integrado, é requerido para definir um sentido médio (Maliska, 2004).

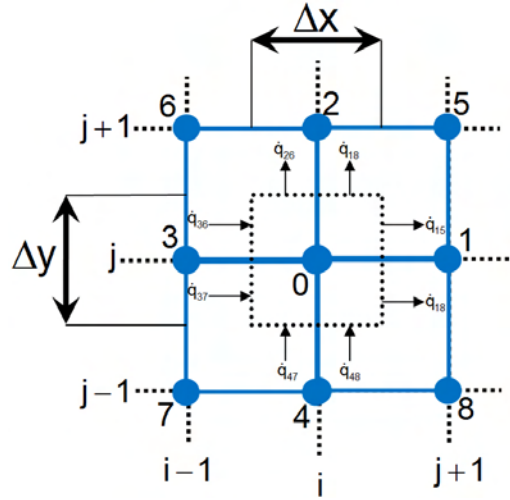


Figura 2.3 – Discretização do volume de controle.

No volume de controle esquematizado na Figura 2.3 têm-se:

$$\dot{q}_{15} + \dot{q}_{18} + \dot{q}_{25} + \dot{q}_{26} - \dot{q}_{36} - \dot{q}_{37} - \dot{q}_{47} - \dot{q}_{48} = 0 \quad (2.38)$$

O fluxo de calor \dot{q} é especificado na equação (1.28), pela Lei de Fourier.

A simplificação do volume de controle para equação de difusão de calor é apresentada a seguir (Hoffman, 2001).

$$\begin{aligned} &2(3 - \beta^2)(T_1 + T_3) + 2(3\beta^2 - 1)(T_2 + T_4) + \\ &+(\beta^2 + 1) \cdot (T_5 + T_6 + T_7 + T_8) - 12(\beta^2 + 1)T_0 = 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Dessa forma, se $\beta^2 = 1$, obtém-se:

$$2(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + 2(T_5 + T_6 + T_7 + T_8) - 12T_0 = 0 \quad (2.40)$$

2-2.2.3. Método de diferenças finitas compacto de quarta-ordem

Esse método foi desenvolvido para resolver problemas bidimensionais elípticos (Wilkinson et al., 2001). Assim, para a equação de Laplace, este método pode ser simplificado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} T_{i+1,j+1} + T_{i+1,j-1} + T_{i-1,j+1} + T_{i-1,j-1} + \frac{2(5-\beta^2)}{\beta^2+1}(T_{i+1,j} + T_{i-1,j}) + \\ + \frac{2(5\beta^2-1)}{\beta^2+1}(T_{i,j+1} + T_{i,j-1}) - 20T_{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Dessa forma, se $\beta^2 = 1$, obtém-se:

$$T_{i+1,j+1} + T_{i+1,j-1} + T_{i-1,j+1} + T_{i-1,j-1} + 4(T_{i+1,j} + T_{i,j+1} + T_{i-1,j} + T_{i,j-1}) - 20T_{i,j} = 0 \quad (2.42)$$

2-3. DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) tem uma ampla aplicabilidade e visa compreender os eventos físicos que ocorrem no fluxo dos fluidos em torno e no interior dos objetos em estudo. Estes eventos estão relacionados à ação e interação de fenômenos como dissipação, difusão, convecção, ondas de choque, superfícies de deslizamento, camadas limite e turbulências. Todos esses fenômenos são descritos pela equação de Navier-Stokes. Um dos aspectos mais importante destas relações é a não-linearidade, e como consequência, muitas vezes a não obtenção de soluções analíticas. Isto, naturalmente, motiva a solução numérica das equações diferenciais parciais associadas. Essa solução para as equações que regem o fluxo de fluido permite obter uma descrição numérica completa do campo de fluxo de interesse.

As equações diferenciais parciais de Navier-Stokes associadas ao processo são convertidas para a forma algébrica em uma malha que define a geometria e o domínio do fluxo de interesse. As condições de contorno iniciais são aplicadas para a malha, e as propriedades e quantidades (temperatura, concentrações, velocidade, pressão e turbulência) são determinadas iterativamente em cada ponto do espaço e do tempo dentro do domínio. Assim, para que a simulação em dinâmica dos fluidos computacionais (CFD)

seja realizada, três etapas básicas (pré-processamento, processamento e pós-processamento) devem ser seguidas (Xia & Sun, 2002).

2-3.1. Pré-processamento

Consiste na entrada dos dados do problema para fluxo no programa computacional implementado em CFD por meio de uma interface de fácil utilização e subseqüentes transformações desses insumos em uma forma adequada para uso do processamento. As atividades do usuário na fase de pré-processamento envolvem.

- Definir a geometria da região de interesse no domínio computacional;
- Gerar a malha com as divisões em subdomínios menores do domínio que não sejam sobrepostas;
- Definir o fenômeno físico ou químico que deverá ser modelado;
- Especificar as propriedades dos fluidos;
- Definir adequadamente as condições de contorno no domínio.

A geometria e a malha podem ser criadas utilizando-se qualquer ferramenta de Projeto Auxiliado por Computador com plataforma para elaboração de geometrias (AutoCAD[®], FreeCad, Rhinoceros[®], SolidWorks[®] e Blender3D) e exportado para o pré-processador.

Geralmente, mais da metade do tempo gasto em projetos industriais utilizando a dinâmica dos fluidos computacional é dedicada à definição da geometria e geração de malha.

Alguns pré-processadores oferecem ao usuário acesso a bibliotecas com propriedades dos materiais já predefinidas para fluidos e sólidos comuns em processos físicos e químicos e permitem a adição de novas propriedades.

2-3.2. Processamento

O processamento em dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é utilizado para obter a solução numérica do modelo, e pode ser descrito e

prevista pelos processos de inicialização, solução de controle, monitoramento da solução, cálculos em CFD e checagem de convergência.

2-3.3. Pós-processamento

Assim como no pré-processamento, uma quantidade enorme de trabalho deve ser desenvolvida no pós-processamento, devido à geração de imagens gráficas na apresentação dos resultados, incluindo:

- Apresentação da malha com o domínio da geometria.
- Traçar os vetores.
- Linhas de contorno e sombreamentos.
- Superfícies bidimensionais e tridimensionais.
- Rastreamento de partícula.
- Manipulação na visualização (rotação, translação e escala).
- Geração de tabelas e gráficos.
- Criação de animação dinâmica dos resultados.

Assim, pode-se dizer que uma análise em dinâmica dos fluidos computacional completa é composta por pré-processamento, processamento e pós-processamento, englobando os procedimentos e fenômenos de forma adequada à configuração do problema a ser analisado, com sua solução, seu monitoramento e análise dos resultados ao final da simulação.

2-3.4. CFD e ANSYS

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é um método em engenharia para simular o comportamento em sistemas, processos e equipamento que envolva fluxos de gases, de líquidos, transferência de calor e massa, reações químicas e fenômenos físicos. ANSYS é um conjunto de programas comerciais para soluções numéricas na modelagem em dinâmica dos fluidos e outros fenômenos físicos com uma abordagem multidisciplinar e a possibilidade de integração com outros tipos de tecnologias de simulação

física, em que as suas principais ferramentas para simulação e análise de fluidos são conhecidas por FLUENT e CFX (Xia & Sun, 2002; ANSYS Inc, 2007).

2-3.5. Programação em ANSYS

Códigos fonte e rotinas em linguagem de programação FORTRAN 77 ou FORTRAN 90 podem ser implementadas para personalizar as particularidades dos modelos físicos em estudo e executadas pelo programa ANSYS CFX durante o processamento. Os comandos para execução do compilador FORTRAN em sua respectiva plataforma podem ser encontrado no **Anexo B**.

O ANSYS possibilita a criação de sub-rotinas por meio de duas formas de implementação no CFX (ANSYS Inc, 2007):

- Definição pelo usuário (usando linguagem de expressão CEL-CFX);
- Utilização de rotinas da caixa de junção para executar o código do usuário.

O usuário pode implementar as seguintes rotinas no ANSYS CFX:

- Entrada de dados (dados de fontes geradas externamente ou dados necessários para as condições de contorno);
- Especificação das condições de contorno;
- Definições das condições iniciais (campos de fluxos gerados externamente, distribuições aleatórias ou perturbações da solução existente);
- Implementações de novos modelos físicos;
- Interação entre a interface ANSYS CFX e outros programas.

A Linguagem de Expressão CFX (CEL-CFX) é uma linguagem interpretada, declarativa, que foi desenvolvida para permitir usuários do ANSYS CFX melhorar suas simulações. A sub-rotina pode ser compilada a qualquer

momento antes da execução do processamento do CFX, depois da criação da função CEL. Para isso, é utilizado o comando “cfx5mkext”. Uma característica fundamental da CEL é que ela é usada dinamicamente pelo Processador CFX.

Na linguagem CEL CFX declara-se o nome e a definição da expressão (opcionalmente adiciona-se comentários ou descrições) usando-se as instruções da linguagem de expressão. As declarações devem estar de acordo com uma sintaxe pré-definida, que é semelhante às declarações da linguagem matemática FORTRAN. A interligação entre a CEL e o processador CFX é realizada por meio de um programa interno chamado “genicode”. O Genicode gera um código intermediário a partir das definições da CEL que grava um arquivo que será interpretado pelo processador CFX durante o processo de solução.

A Linguagem de Expressão CEL CFX permite a utilização de funções predefinidas (**Anexo C**) e a criação de novas funções personalizadas. Assim, podem-se utilizar estas funções em qualquer expressão. Essa função utiliza passagem de parâmetros para a rotina que retorna os valores para a quantidade de interesse como demonstrado na Figura 2.4.

A CEL também possui funções adicionais especializadas (**Anexo D**) que são utilizadas para cálculos em CFD. Entretanto, essas funções são de usos específicos e disponíveis para utilização no pré-processamento e processamento do CFX. Estas funções adicionais da CEL não se aplicam ao uso da CEL no pós-processamento CFX.

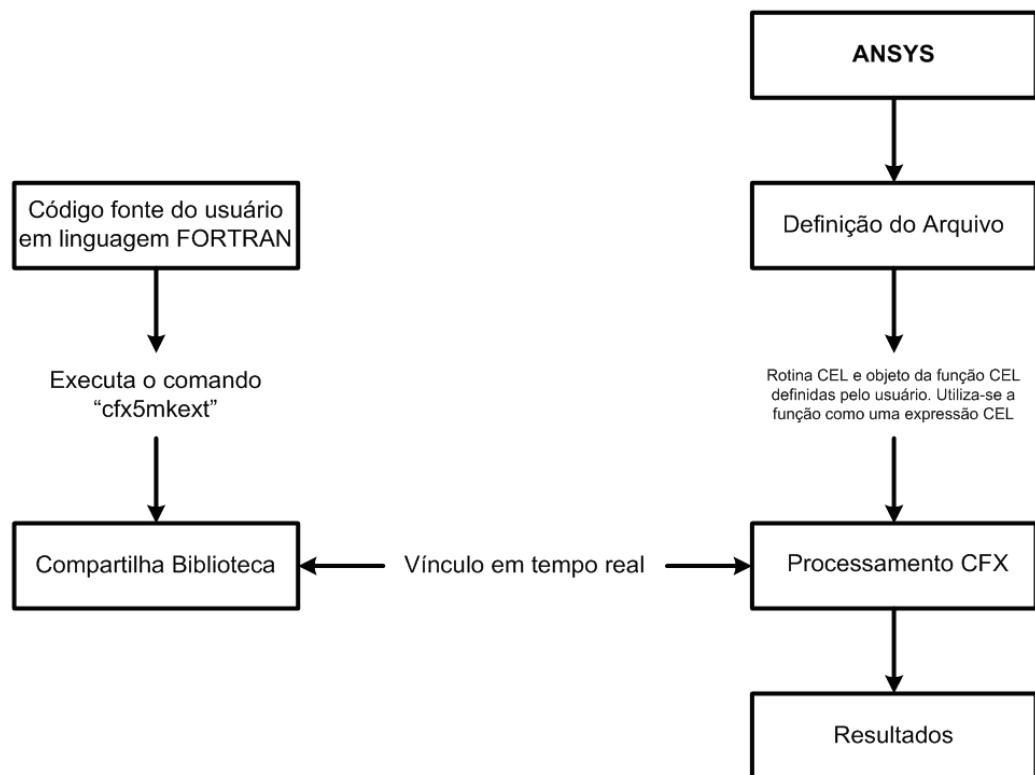


Figura 2.4 – Representação do conceito da Linguagem de Expressão CFX.
Fonte: (ANSYS Inc, 2007).

2-4. ANÁLISE DIMENSIONAL

Apesar de muitos problemas práticos na engenharia, que envolvem a transferência de calor, de momento e transporte de massa, possam ser modelados e resolvidos usando equações e procedimentos que descrevem seus processos, um grande número de problemas pode ser resolvido apenas se os modelos matemáticos forem relacionados aos dados obtidos experimentalmente.

Pode-se dizer que poucos problemas que envolvem transferência de calor, de momento e fluxo de massa podem ser resolvidos somente pela análise matemática. A solução para muitos problemas práticos é conseguida utilizando-se uma combinação de análises teóricas e dados experimentais. Assim, os engenheiros que trabalham em problemas de engenharia agrícola devem estar familiarizados com a abordagem experimental para estes problemas. Eles têm que interpretar e fazer uso dos dados obtidos e ser capazes de planejar e executar os experimentos necessários em laboratórios.

As considerações básicas em análise dimensional e teoria de similitude são, também, utilizadas para auxiliar o engenheiro a compreender e correlacionar os dados que foram obtidos em seus experimentos ou por outros pesquisadores. Um dos objetivos da pesquisa experimental é analisar os sistemas, a fim de torná-los o mais aplicável possível. Assim, para alcançar este objetivo, o conceito de semelhança é freqüentemente utilizado. Os dados obtidos em um experimento podem ser usados para descrever o comportamento de outros sistemas semelhantes. Modelos são utilizados para estudar o fenômeno de interesse sob condições cuidadosamente controladas. Formulações empíricas podem ser desenvolvidas, ou predições específicas de uma ou mais características de sistemas semelhantes podem ser feitas a partir do estudo destes modelos (Giovanni, 2011; Vekariya et al., 2011).

Uma das primeiras contribuições no estudo de análise dimensional foi apresentada por Fourier (1822), com um trabalho sobre a propagação térmica, em que foi apresentado também o conceito de homogeneidade dimensional das equações. Posteriormente, Clerk-Maxwell (1869) definiu a simbologia para força $[F]$, massa $[M]$, comprimento $[L]$, tempo $[T]$ e temperatura $[\theta]$, chamando-as de dimensões.

Com base nestas simplificações podem-se considerar as dimensões das variáveis envolvidas em um problema. Desta forma, sabe-se que as grandezas físicas básicas como massa (kg), comprimento (m), tempo (s), temperatura (K), quantidade de matéria (mol), intensidade luminosa (cd) e corrente elétrica (A) podem ser dadas em termos de dimensões de $[M]$, $[L]$, $[T]$, $[\theta]$, $[N]$, $[\Lambda]$ e $[A]$, respectivamente.

A análise dimensional pode ser utilizada para verificar se as unidades de medidas utilizadas nas variáveis do processo estão corretas e averiguar as equações que caracterizam um processo, assim como a homogeneidade dimensional das relações físicas.

2-4.1. Teorema-II de Buckingham

O teorema básico em análise dimensional é, geralmente, conhecido como o Teorema-II de Buckingham, assim chamado porque envolve o produto

de grupos de quantidades, sendo base para aplicação a uma grande variedade de problemas.

Ao realizar a análise dimensional de um processo, tem-se, primeiramente, por meio do Teorema- Π de Buckingham e pelo teorema fundamental da análise dimensional, que definir o número de grupos adimensionais que serão necessários para substituir as variáveis originais do processo.

Se um processo é caracterizado por uma equação que envolva m variáveis físicas, então essa equação poderá ser reduzida a uma relação entre $m-r$ grupos adimensionais independentes, em que r representa o número de dimensões básicas usadas para descrever essas variáveis (Buckingham, 1914; Buckingham, 1915; Murphy, 1950).

Para representar que o grupo adimensional é um produto, Buckingham utilizou o símbolo grego Π para os grupos adimensionais, chamando-os de Grupos- Π . O teorema- Π é baseado na idéia de homogeneidade dimensional das equações ou na relação que caracteriza um processo em particular. Assim, quaisquer equações com significado físico, que caracterize um processo e que envolva m variáveis, como apresentado na Equação (2.43), devem possuir as mesmas dimensões, tanto no lado esquerdo quanto no lado direito da equação. Dessa forma, a Equação (2.43) pode ser transformada em um conjunto de produtos adimensionais ou Grupos- Π , como apresentado na Equação (2.44).

$$y_1 = (x_1, x_2 \dots x_m) \quad (2.43)$$

$$\Pi_1 = f(\Pi_1, \Pi_2 \dots \Pi_{m-r}) \quad (2.44)$$

2-4.2. Grupos- Π

A determinação dos Grupos- Π deve ser considerada no início da modelagem do processo utilizando a análise dimensional. Pode-se considerar que um modelo é completamente estabelecido se a função característica geral do processo puder ser especificada por meio de dados experimentais depois da aplicação deste método (Giovanni, 2011; Vekariya et al., 2011).

Essa análise consiste em dividir o método em uma série de etapas distintas relativas ao problema. Assim, a metodologia para a análise dimensional pode ser realizada pelas seguintes etapas:

- 1) Listagem de todas as variáveis que estão envolvidas no fenômeno investigado. É necessário que se tenha um bom conhecimento dessas variáveis;
- 2) Descrição de cada variável por meio de sua fórmula dimensional;
- 3) Determinação do número necessário de Grupos- Π ;
- 4) Seleção do grupo de variáveis de repetição. O número de variáveis de repetição e dimensões básicas envolvidas no problema são os mesmos;
- 5) Criação de cada termo Π multiplicando cada variável não repetida pelo grupo de variáveis de repetição, atribuindo, assim, os valores para cada termo e identificar o valor do Π atual. Repetir essa etapa para todas as variáveis que não sejam de repetição.
- 6) Verificação de que todos os termos do Grupo- Π são adimensionais.
- 7) Expressão da forma final como uma relação entre os termos Π adicionando comentários se necessário.

2-4.3. Seleção das Variáveis

Não há um processo simples que permita que as variáveis sejam facilmente identificadas. Devido a isso, a seleção das variáveis que estão envolvidas no problema é uma das questões mais difíceis e importantes na análise dimensional. Geralmente, é necessário ter uma boa compreensão dos fenômenos e das leis físicas envolvidas no processo. Se variáveis importantes forem omitidas, um resultado incorreto poderá ser produzido. Entretanto, se forem adicionadas variáveis não pertinentes ao fenômeno, um número excessivo de termos Π aparecem na solução final, exigindo um tempo maior para eliminá-los experimentalmente. Deve-se, então, ser dada a atenção

necessária na determinação das variáveis para evitar tanto a omissão de variáveis quanto a inserção de variáveis não pertinentes.

As variáveis pertinentes a um fenômeno podem ser classificadas em quatro grupos quando for utilizada a análise dimensional como metodologia:

- 1) Variáveis pertinentes à geometria do sistema analisado (pode ser descrita por uma série de comprimentos e ângulos);
- 2) Variáveis das propriedades dos materiais (massa específica, difusividade, capacidade térmica, condutividade, viscosidade, dentre outras);
- 3) Variáveis da dinâmica interna do processo (coeficiente de atrito, coeficientes de calor e massa de interfaces, dentre outras);
- 4) Variáveis referentes aos efeitos externos ao sistema, mas que influencie na dinâmica do processo (velocidade, aceleração da gravidade, pressão, aquecimento externo, dentre outras).

Para que se obtenham as variáveis, deve-se definir claramente o problema usando um modelo descritivo, com o auxílio de apresentações gráficas, estabelecendo as principais variáveis de interesse, assim como considerar as leis básicas que descrevem o fenômeno em questão ou teoria empírica que descreva o fenômeno, identificando as variáveis independentes. É necessário identificar as variáveis quanto aos grupos descritos anteriormente e verificar se existem variáveis não inclusas nestes quatro grupos e se elas devem ser consideradas, certificando-se de que todas sejam independentes.

O método apresentado fornece um procedimento sistemático que, quando executado corretamente, fornece um conjunto correto e completo de termos Π , em que somente uma lista de variáveis deve ser determinada pelo pesquisador.

2-4.4. Análise de sensibilidade dos problemas de convecção-difusão com termo fonte

A análise de sensibilidade permite verificar se um modelo produz resultados lógicos em função de alterações nos parâmetros de entrada,

resultando em informações sobre o comportamento do modelo e possíveis falhas de desenvolvimento (Evangelista & Ferreira, 2006).

Depois dos testes do modelo, deve ser feita a análise de sensibilidade, estudando como e quando as variações dos diversos parâmetros afetam o comportamento do modelo. Com a análise de sensibilidade, é possível inferir quais os parâmetros que mais influenciam no modelo. Assim, deve-se focar a atenção neles, variando-os e observando as suas modificações.

2-5. INSTRUMENTAÇÃO

Neste trabalho, optou-se por utilizar dispositivos digitais endereçáveis para desenvolver o sistema de aquisição de dados, embasado em experiências anteriores em outros trabalhos que forneceram resultados viáveis técnica e economicamente. Em particular, optou-se por utilizar os dispositivos digitais endereçáveis da série 1-WireTM, por razões a seguir apresentadas.

2-5.1. Dispositivos digitais endereçáveis da série 1-Wire[®]

A utilização de dispositivos digitais endereçáveis da série 1-WireTM para aquisição de dados torna-se interessante, uma vez que reduz custos com instrumentação, pois não é necessário utilizar sistema de aquisição de dados convencional. A rede de sensores constituída com dispositivos da série 1-WireTM utiliza apenas um condutor para transmissão de dados, comum a todos os dispositivos ou instrumentos (escravos ou clientes) ligados à rede, e um computador ou microprocessador (mestre ou servidor) que, por meio de um programa computacional apropriado, gerencia todo o sistema, além de ser técnica e economicamente viável (Steidle Neto et al., 2005; Lopes et al., 2007; Monte et al., 2008; Rocha et al., 2008).

Uma breve descrição de alguns dispositivos da série 1-WireTM é apresentada na Tabela 2.4. Uma descrição mais detalhada é apresentada a seguir.

Tabela 2.4 – Dispositivos da série 1-Wire™

Dispositivos Suportados	Código da Família	Descrição V 1.2	Temperatura V 1.3	Umidade V 1.3	Chave V 1.1	Potenciômetro V 1.3	A to D V 1.2	Relógio V 1.2	Memória V 1.3	Arquivo V 1.3	DS1963S SHA	DS1961S SHA	Thermochron	Mission	Observações	
											V 1.2	V 1.3	V 1.5	V 1.6		
DS1990A	01	✓														
DS1991*, DS1205*	02	✓														1)
DS1994*	04	✓						✓	✓	✓						
DS2405	05	✓			✓											
DS1993	06	✓														
DS1992	08	✓														
DS1982, DS2502	09	✓														
DS1995	0A	✓														
DS1985, DS2505	0B	✓														
DS1996	0C	✓														
DS1986, DS2506	0F	✓														
DS1920, DS1820	10	✓	✓													
DS2406	12	✓			✓											
DS1983, DS2503	13	✓														
DS1971, DS2430A*	14	✓														2)
DS1954, DS1955	16	✓														
DS1963S	18	✓									✓					
DS1963L*	1A	✓														
DS2436	1B	✓														
DS2423*	1D	✓														
DS2409*	1F	✓			✓											
DS2450	20	✓					✓									
DS1921	21	✓	✓					✓					✓			
DS1822	22	✓	✓													
DS1973, DS2433	23	✓														
DS1904, DS2415	24	✓														
DS2438	26	✓	✓				✓	✓								
DS2417	27	✓		✓				✓								
DS18B20	28	✓	✓													
DS2408	29	✓			✓											
DS2890*	2C	✓				✓										
DS2431	2D	✓							✓							
DS2760	30	✓					✓									
DS1961S, DS2432	33	✓										✓				3)
DS1977	37	✓														
DS1922, DS2422	41	✓	✓				✓	✓	✓	✓						4)
DS1923	41	✓	✓	✓				✓	✓	✓						

¹⁾ O Visualizador para este dispositivo não está incluído no OneWireViewer, utilizar Secure Viewer da I-Button.

²⁾ É possível a formatação do dispositivo, porém não é possível armazenamento de arquivos na memória.

³⁾ Acesso de segurança necessária por meio do visualizador do DS1961s SHA.

⁴⁾ Suporte de A a D somente para DS2422

* Dispositivos não recomendados para novos projetos.

Fonte: MAXIM (2009)

DS1990A: Registro eletrônico i-Button para autenticação automática. Utiliza transferência de dados por meio do protocolo 1-Wire®, com registro de identificação de 65 bits para possibilidade de rastreamento.

DS2405, DS2406: Dispositivo para troca de canais por ação ativa ou inativa, utilizando protocolo 1-Wire®.

DS(1992, 1982,1993, 2502, 1995, 1985, 2505, 1996, 1986, 2506): Memória em i-Button, utilizados para ler e, ou, escrever dados em base localizada com o mínimo de equipamento. Estes dispositivos possuem memórias do tipo não volátil e sistema de cronometragem para armazenamento e recuperação das informações ao qual o i-Button está conectado. Os dados são transmitidos por meio do protocolo 1-Wire[®].

DS1920, DS1820 (DS18B20, DS18S20), DS1822: Termômetro digital com faixa de medição de temperatura entre -55°C e $+125^{\circ}\text{C}$, com resolução de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ na faixa de temperatura de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$, comunicando-se pelo protocolo 1-Wire[®] com um microprocessador central.

DS2450: Conversor baseado em aproximação sucessiva de conversão analógica para digital quatro por um multiplexada.

DS1921: Sistema auto-suficiente com memória para medição de temperatura e gravação dos dados com capacidade superior a 2048 dados de temperatura em intervalos entre 1 a 255 minutos. Os dados são transferidos por meio do protocolo 1-Wire[®].

DS1973, DS2433: Memória programável de apenas leitura apagável eletricamente (EEPROM) para identificação e armazenamento das informações relevantes para o produto ao qual está associado, sendo obtido exclusivamente a partir da linha de comunicação 1-Wire[®].

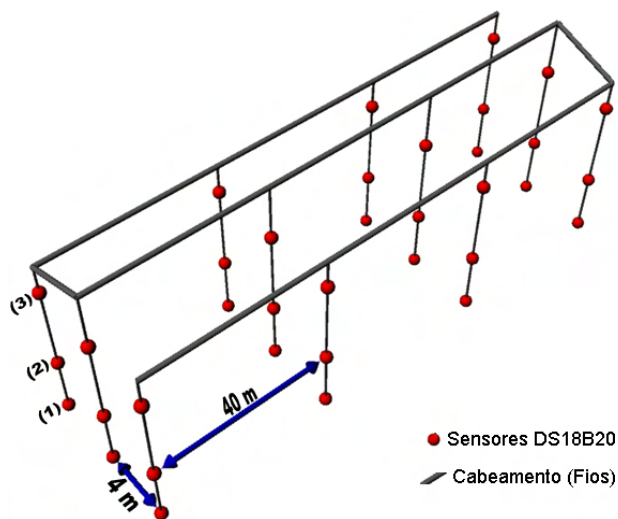
DS1904, DS2415, DS2417: Relógios para medições em tempo real com interface do protocolo 1-Wire[®] e precisão de 2 minutos/mês a 25°C .

DS1923: Registro de temperatura e umidade relativa com armazenamento dos dados auto-suficiente na memória, com total de 8.192 leituras de 8 bits ou 4096 em 16 bits, em intervalos entre 1 s e 273 h. Possui 512 bytes de SRAM para armazenamento de informações específicas para cada aplicação e 64 bytes de dados para calibração. Configuração e comunicação com o servidor por meio do protocolo 1-Wire[®].

DS2438: Monitor de bateria inteligente. Este dispositivo oferece as seguintes funções: (i) marcação das baterias com um único número de série e um sensor de temperatura, que elimina a necessidade de termistores na bateria; (ii) um conversor A/D, para medir a tensão da bateria e de corrente; (iii) um acumulador de corrente integrado que mantém a corrente total e toda a

corrente que entra ou sai da bateria; (iv) um medidor de tempo e 40 bytes de memória não-volátil (EEPROM), para armazenamento de parâmetros importantes, tais como a composição química da bateria, a capacidade da bateria, a metodologia de carregamento e dados de montagem. A configuração e comunicação com o servidor é realizada por meio do protocolo 1-Wire[®].

Para ilustrar a utilização da tecnologia 1-Wire[®], foram utilizados dados reais adquiridos por meio da adaptação do sistema STRADA (Rocha, 2008), em um projeto em desenvolvimento na Área de Construções Rurais e Ambiente do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Foram instalados 36 sensores de temperatura DS18B20 conectados por meio de 500 m de cabo telefônico de 2 pares, criando-se uma matriz de 3×3×4 pontos de observação em um galpão avícola de 12,5×3×125 m como mostrado na Figura 2.5.



(1) Interior da Cama (0,5cm); (2) Altura média (1,2m); (3) Altura do teto (3,0m)

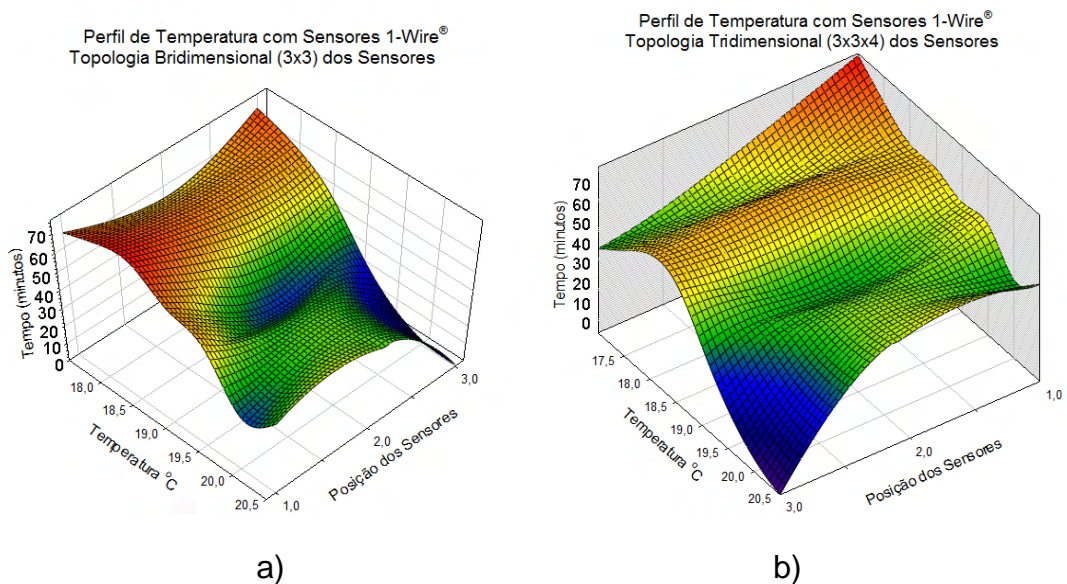
Figura 2.5 – Disposição dos sensores instalados no experimento para coleta de dados com o sistema 1-Wire[®] entre os dias 22/06/2009 a 29/07/2009.

Foi utilizado um adaptador USB (Barramento Serial Universal) DS9490R conectado a um computador portátil com processador Intel Pentium de 100 Mhz e 64 MB de memória RAM para transferência dos dados por meio da rede 1-Wire[®] (Dallas Semiconductor, 2001; Dallas Semiconductor, 2002). O sistema operacional utilizado foi Windows 95.

O fornecimento de energia para o sistema 1-Wire[®] pode ser de duas maneiras: (1) com a alimentação parasita, sendo derivada do condutor de transmissão de dados, necessitando de somente dois condutores; (2) alimentação externa, em que são necessários três condutores, além de uma fonte de alimentação estabilizada de 5 Vcc (Steidle Neto et al., 2005). Essa segunda opção não foi utilizada neste experimento, aplicando-se somente a alimentação parasita para toda a rede.

Este exemplo torna-se interessante, uma vez que a estrutura topológica utilizada nesse galpão avícola assemelha-se à proposta para ser utilizada no silo graneleiro.

Os dados de temperatura foram coletados diariamente no período de 22 de junho a 29 de julho de 2009. Entretanto, para esse exemplo, foram utilizados os dados de temperatura coletados durante 70 minutos no 23^o dia de observação, entre os horários de 00h54min e 02h04min. Foram traçados os perfis de temperatura, como apresentado na Figura 2.6 (a, b).



Posição dos sensores: 1) Nível da Cama (5 cm); 2) Altura média (1,2m) e 3) Nível do teto (3 m)

Figura 2.6 – Perfis de temperatura referente à aquisição de dados no dia 23/07/2009 com sistema 1-Wire[®] utilizando DS-18B20 e DS-9490R com topologia a) bidimensional e b) tridimensional dos sensores, em um galpão avícola, utilizando o algoritmo com base no sistema STRADA (Rocha, 2008).

A Figura 2.6 (a, b) representa a variação de temperatura, mostrando que, no interior da cama, os valores de temperatura são bem menores do que aqueles na altura do teto. Estes dados estão de acordo com o esperado.

Os comandos e funções relacionados à comunicação entre os sensores do sistema 1-Wire[®] no cliente e no servidor do sistema foram inseridos diretamente no código fonte, de acordo com a necessidade do experimento. Deve-se levar em consideração que a transmissão dos dados no programa computacional foi realizada em tempo real, possuindo portabilidade também para o sistema operacional Linux.

Desta forma, comprova-se a adequação do sistema proposto na utilização de sensores 1-Wire[®]. Vale salientar que é irrelevante o tempo de coleta de dados e a natureza dos dados coletados para o contexto do sistema STRADA, por tratar-se de um sistema de caráter geral (Rocha, 2008).

2-6. REFERÊNCIAS

- Andrade, E. T.; Couto, S. M.; Queiroz, D. M.; Peixoto, A. B. ***Determinação de Propriedades Térmicas de Grãos de Milho***. Ciência e Agrotecnologia 28(3) (2004).
- ANSYS Inc. ***ANSYS CFX 11.0 - Technical Specifications***. Contract Holder (2007).
- Bakker-Arkema, F. W.; Lerew, L. E.; Brook, R. C.; Brooker, D. B. ***ENERGY AND CAPACITY PERFORMANCE EVALUATION OF GRAIN DRYERS***. Paper - American Society of Agricultural Engineers (1978).
- Boonen, C.; Janssens, K.; Berckmans, D. ***Data-Based Modeling of the Spatiotemporal Temperature Distribution in a Reach-In Plant Growth Chamber***. Transactions of the ASAE: American Society of Agricultural Engineers 45(4) (2002).
- Brooker, D. B.; Hall, C. W.; Bakker-Arkema, F. W. ***Drying Cereal Grains***, AVI Pub. Co (1974).
- Buckingham, E. ***On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations***. Physical Review 4(4): 345 (1914).
- Buckingham, E. ***The principle of similitude***. Nature 96(2406): 396-397 (1915).
- Clerk-Maxwell, J. ***Remarks on the Mathematical Classification of Physical Quantities***. London Mathematical Society (1869).
- Coelho, M. P. ***Simulação do processo de resfriamento de grãos usando a mecânica dos fluidos computacional***. Departamento de Engenharia Agrícola. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa - UFV. Mestrado (2009).
- Dallas Semiconductor. ***Guidelines for Reliable 1-Wire™ Networks***. Maxim (2001).
- Dallas Semiconductor. ***High precision digital thermometer***. Maxim (2002).
- Evangelista, A. W. P.; Ferreira, P. A. ***Análise de sensibilidade do sistema de drenagem agrícola-SDA mediante variação dos parâmetros da entrada***. Ciência e Agrotecnologia 30: 133-139 (2006).

- Fourier, J. B. J. ***Théorie Analytique de le chaleur***. (1822).
- França, A. S.; Fortes, M.; Haghghi, K. ***Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials***. Drying Technology 12(7): 1537-1560 (1994).
- Giovanni, M. ***The power of dimensional analysis in production systems design***. International Journal of Production Economics 131(1): 175-182 (2011).
- Hirsch, C. ***Numerical Computation of Internal and External Flows***, Butterworth-Heinemann (2007).
- Hoang, M. L.; Verboven, P.; De Baerdemaeker, J.; Nicola, B. M. ***Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics***. International Journal of Refrigeration 23(2): 127-140 (2000).
- Hoffman, J. D. ***Numerical Methods for Engineers and Scientists***. New York, Marcel Dekker (2001).
- Jia, C. C.; Yang, W.; Siebenmorgen, T. J.; Cnossen, A. G. ***Development of Computer Simulation Software for Single Grain Kernel Drying, Tempering, and Stress Analysis***. Transactions of the ASAE: American Society of Agricultural Engineers 45(5) (2002).
- Kaviany, M. ***Principles of heat transfer in porous media***. New York, Springer-Verlag (1995).
- Li, H.; Morey, R. V. ***Thin-Layer Drying of Yellow Dent Corn***
Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 27(2): 581-585 (1984).
- Li, W.; Sokhansanj, S. ***Resistance of bulk alfalfa seed to airflow***. Canadian Agricultural Engineering (1994).
- Lopes, D. C.; Martins, J. H.; Monteiro, P. M. B.; Queiroz, D. M. ***Redes 1-Wire aplicadas à aeração de grãos armazenados***. Acta Scientiarum. Agronomy 29(2) (2007).
- Maliska, C. R. ***Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional***. Rio de Janeiro, Ltc Editora (2004).

- Martinovic, D.; Horman, I.; Demirdzic, I. **Numerical and experimental analysis of a wood drying process**. Wood Science and Technology 35(1): 143-156 (2001).
- Martins, J. H. **Thin-Layer Drying Rates of Corn Hybrids Related to Performance of High-Speed, High Temperature Column Batch Dryer**. Department of Agricultural Engineering. Purdue University, P.U., Estados Unidos. PhD (1988).
- Massarani, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. Rio de Janeiro, E-Paper (1999).
- Maxim. **OneWireViewer - User's Guide, Version 1.3**, Dallas Maxim Semiconductor (2009).
- Monte, J. E. C.; Martins, J. H.; Lopes, D. C.; Monteiro, P. M. B.; Pinto, P. R. **Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina**. Acta Scientiarum 30 (3) (2008).
- Murphy, G. **Similitude in engineering**. New York, Ronald Press Co. (1950).
- Piskounov, N. **Cálculo Diferencial e Integral**, Lopes e Silva (1984).
- Rocha, K. S. O. **Sistema computacional multiplataforma para armazenamento e transmissão remota de dados**. Departamento de Engenharia Agrícola - DEA. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa - UFV. Magister Scientiae: 47 (2008).
- Rocha, K. S. O.; Martins, J. H.; Tinôco, I. F. F.; Melo, E. C.; Lopes, D. C.; Hermsdorff, W. **Remote environmental monitoring and management of data systems**. Livestock Environment VIII - Proceedings of the 8th International Symposium, Iguassu Falls (2008).
- Steidle Neto, A. J.; Baêta, F. C.; Martins, J. H.; Zolnier, S.; Monteiro, P. M. B. **Avaliação da transmissão de dados de temperatura no sistema 1-wire™**. Engenharia Agrícola 25: 29-36 (2005).
- Tu, J.; Yeoh, G. H.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**, Butterworth-Heinemann (2008).
- Vekariya, P.; Subbaiah, R.; Mashru, H. **Hydraulics of microtube emitters: a dimensional analysis approach**. Irrigation Science 29(4): 341-350 (2011).

- Verboven, P.; Scheerlinck, N.; De Baerdemaeker, J.; Nicolaã, B. M. ***Sensitivity of the food centre temperature with respect to the air velocity and the turbulence kinetic energy.*** Journal of Food Engineering 48(1): 53-60 (2001).
- Wilkinson, P. B.; Fromhold, T. M.; Tench, C. R.; Taylor, R. P.; Micolich, A. P. ***Compact Fourth-Order Finite Difference Method for Solving Differential Equations.*** The American Physical Society 64 (2001).
- Xavier Jr., A. L. ***Modelagem computacional em problemas de eletrostática: efeito de campos de borda em capacitores cilíndricos finitos.*** Revista Brasileira de Ensino de Física 29: 241-249 (2007).
- Xia, B.; Sun, D.-W. ***Applications of computational fluid dynamics (cfd) in the food industry: a review.*** Computers and Electronics in Agriculture 34(1-3): 5-24 (2002).
- Xia, B.; Sun, D. W. ***Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review.*** Computers and Electronics in Agriculture 34(1-3): 5-24 (2002).
- Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. ***The Finite Element Method: Fluid Dynamics.*** Oxford, Butterworth-Heinemann (2000).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

O presente projeto foi desenvolvido na Área de Energia na Agricultura e na Área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola, pertencentes ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

3-1. Implementação do modelo computacional de convecção-difusão em meios porosos

As distribuições de velocidade do ar, da temperatura, da umidade relativa e da pressão no interior da massa de grãos em silos graneleiros foram determinadas por meio do desenvolvimento e da implementação de um modelo computacional utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional, implementado no programa comercial CFX[®], versão 11 SP-1 (ANSYS Inc, 2007).

O processo de resfriamento de uma massa de grãos armazenada pode ser descrito pela seguinte equação diferencial em uma forma geral (França et al., 1994):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \phi) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \cdot \nabla \phi) + S \quad (3.1)$$

em que

- ρ - Massa específica ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
- ϕ - Variável dependente;
- Γ - Coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);
- \vec{v} - Vetor velocidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
- S - Termo fonte.

A Tabela 3.1 relaciona cada termo na Equação (3.1) aos termos correspondentes nas Equações (2.6), (2.9), (2.10) e (2.11), apresentadas no Capítulo 2.

Tabela 3.1 - Correspondência entre a equação geral de transporte, Equação (3.1), e as Equações (2.6), (2.9), (2.10) e (2.11)

Variável	Parâmetros				
	ϕ	ρ	\vec{v}	Γ	S
Pressão	P	-	-	$k = A \nabla P ^{(\beta-1)}$	-
Razão de umidade do ar	W	ρ_a	\vec{v}	-	$-\frac{\rho_g}{\varepsilon} \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right)$
Temperatura do ar	T	ρ_a	\vec{v}	-	$\frac{h_c a \theta}{c_a + c_v W} - \left(\frac{h_c a}{c_a + c_v W} \right) (T)$
Teor de água do grão	M	ρ_g	-	-	$\alpha \beta t^{\beta-1} (M_e) - \alpha \beta t^{\beta-1} (M)$
Temperatura do grão	θ	ρ_g	-	-	$\frac{h_c a T + \rho_g (c_v T + h_{fg}) \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right)}{c_g + c_w M} + \left[\frac{\rho_g c_v \left(\frac{\partial M}{\partial t} \right) - h_c a}{c_g + c_w M} \right] \theta$

A solução das equações que compõem o modelo matemático foi implementada utilizando-se malhas computacionais, considerando-se a simetria do problema, conforme mostrado na Figura 3.1.

A geometria do silo graneleiro e as malhas computacionais foram geradas utilizando o programa comercial *Ansys Workbench* (ANSYS Inc, 2007).

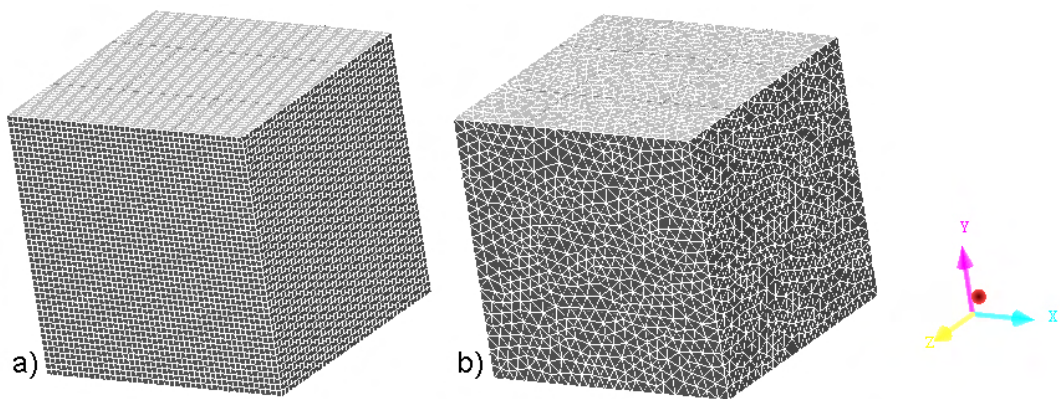


Figura 3.1. Exemplo de malhas de pontos para o problema proposto: a) hexaédrica; b) tetraédrica.

O modelo matemático completo do processo de resfriamento de grãos é descrito pelas equações (2.6), (2.9), (2.10) e (2.11), apresentadas no Capítulo 2, com os termos fontes e parâmetros definidos na Tabela 3.1 -. Essas equações foram implementadas no programa computacional CFX[®]. A temperatura e a vazão de ar na entrada do silo foram mantidas constantes. Foi utilizada a condição de contorno de Neumann nas demais faces do domínio.

3-2. Geometria e geração da malha

Esse processo constitui o primeiro estágio do pré-processamento computacional, cujo objetivo é produzir uma malha em que estão especificados os parâmetros físicos. Para criar a malha, torna-se necessário desenvolver a geometria do sólido do qual se deseja fazer a modelagem. A geometria e a malha podem ser criadas utilizando-se qualquer ferramenta de Projeto Auxiliado por Computador (CAD) com plataforma para elaboração de geometrias (AutoCAD[®], FreeCad, Rhinoceros[®], SolidWorks[®] e Blender3D) e exportado para o pré-processador.

Ao gerar a malha deve-se aumentar o número de elementos na região de interesse onde se deseja estudar mais profundamente o fenômeno, como perfis de velocidade, campos de pressão, perda de carga, dentre outros, ou seja, deve-se refinar a malha.

Foi projetado e construído um protótipo de silo graneleiro com as mesmas características de um silo em tamanho real, para testar e validar o modelo computacional implementado. A Figura 3.2 ilustra a malha

computacional com base na geometria do protótipo do silo graneleiro construído.

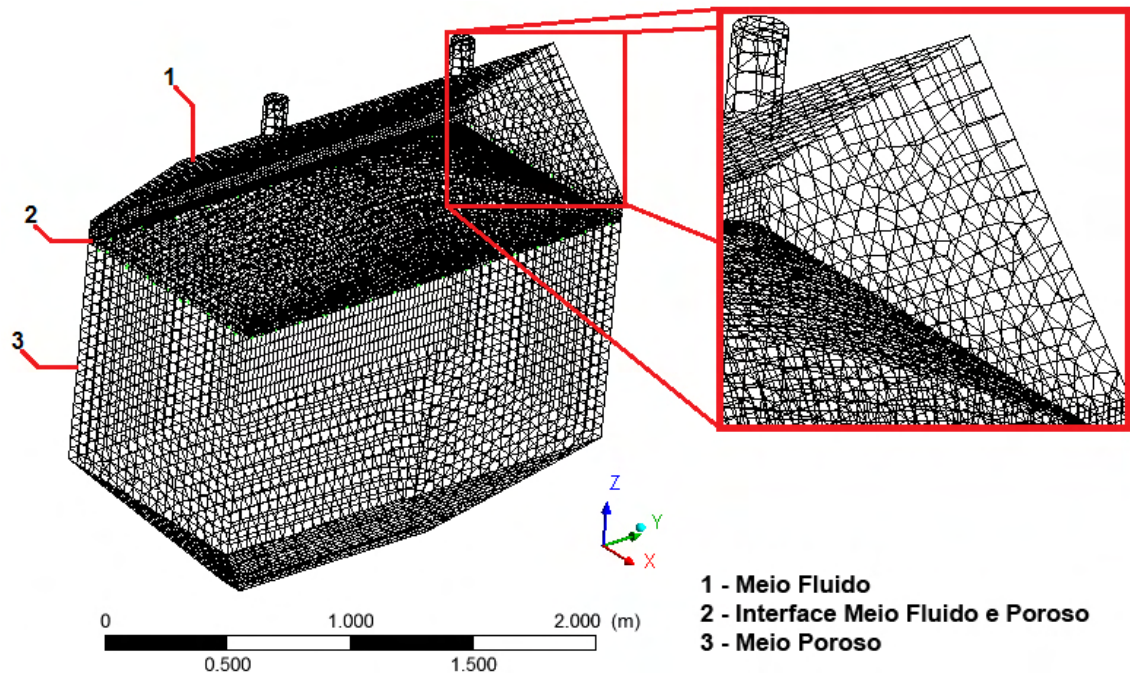


Figura 3.2 – Malha da estrutura formada por elementos hexaédricos.

3-3. Simulação do processo de resfriamento de uma massa de grãos

O processo de resfriamento de uma massa de grãos de milho armazenada em um silo graneleiro piloto foi simulado utilizando-se o modelo matemático apresentado no item 3-1. Na implementação do modelo foram utilizadas as propriedades físicas do produto apresentadas no item 2-1.4 do Capítulo 2.

3-4. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo para o caso de resfriamento de uma massa de grãos de milho

Foram realizados testes de malha e de passo de tempo, para determinar os valores ótimos para as dimensões da malha e do passo de tempo (Coelho, 2009).

Os valores de alguns parâmetros do modelo foram variados dentro de uma faixa pré-definida, de acordo com os resultados da simulação realizada no item 3-3. A variação dos valores desses parâmetros, dentro de limites aceitáveis para o problema proposto, permitiu a definição daqueles que têm

importância significativa nos resultados do modelo e a eliminação ou a fixação daqueles com menor significação.

3-5. Avaliação dos efeitos no processo de resfriamento

As condições psicrométricas do ar intergranular foram determinadas por meio das equações da psicrometria. O cálculo da temperatura do ponto de orvalho e da umidade relativa do ar intergranular, em vários pontos da massa de grãos, permitiu determinar as melhores condições a serem usadas para o ar na entrada do sistema de resfriamento. Por meio da simulação do processo de resfriamento, foi possível obter subsídios para definição de estratégias de controle inteligente e medidas de prevenção para evitar a ocorrência de condensação.

3-6. Desenvolvimento do protótipo e validação do modelo computacional

Os testes de validação são partes necessárias no processo de modelagem, sendo um parâmetro que garante o sucesso entre a predição numérica e o experimento (Xia & Sun, 2002).

Para testar o sistema proposto, foi construído um modelo de um silo graneleiro (protótipo) dotado de um sistema de monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar intergranular. O fluxo de ar na entrada do sistema de ventilação do silo é controlado e a umidade relativa do ar ambiente externo monitorada.

A escolha desse tipo de silo deveu-se à sua grande utilização no sistema nacional de armazenagem a granel, ao seu custo de construção e à sua facilidade de carregamento e descarregamento, além da agilidade de construção (Oliveira & Martins, 2009).

Quando grandes quantidades de grãos ou outros produtos agrícolas devem ser armazenados por longos períodos de tempo, ou mesmo devido à impossibilidade de construção de silos verticais por causa das propriedades do solo em certas regiões, os silos graneleiros (armazéns horizontais) são freqüentemente utilizados. Os silos graneleiros têm uma grande participação no sistema nacional de armazenagem a granel. Os silos horizontais geralmente

apresentam fundo em forma de V possuindo equipamento automático para carga e descarga.

3-6.1. Construção do protótipo

Foi construído um protótipo (Figura 3.3) de um silo horizontal em escala reduzida de 1:10 considerando-se as simetrias.

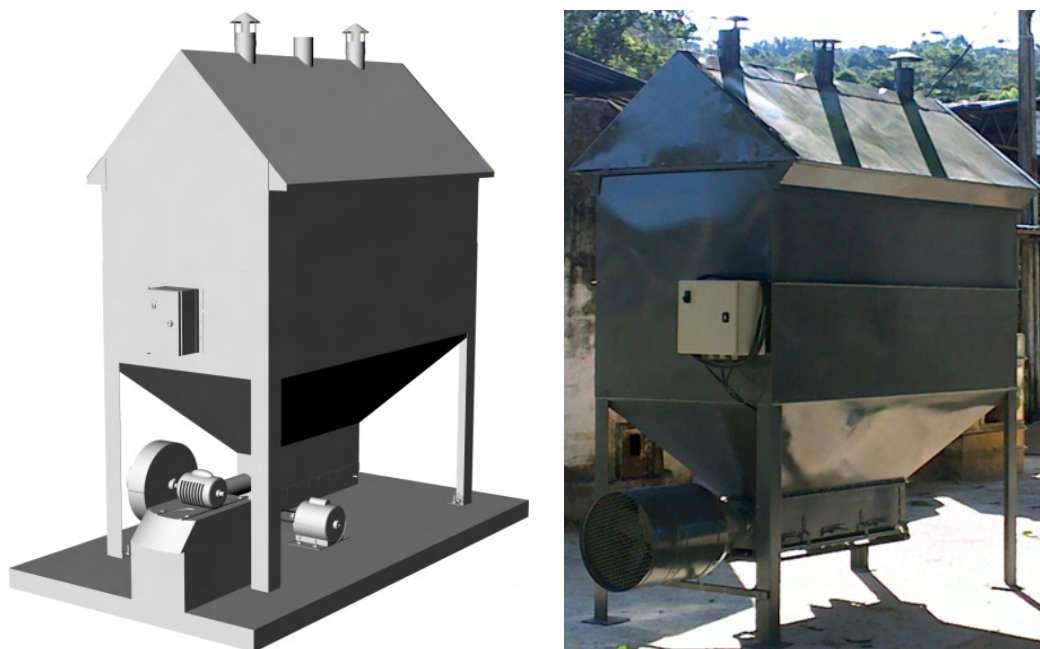


Figura 3.3 – Representação tridimensional do protótipo do silo graneleiro.

Na construção do protótipo foram utilizadas chapas metálicas na superfície e nas paredes da seção retangular e trapezoidal de armazenamento. A cobertura foi constituída de chapas metálicas com 30° de inclinação, com calhas de isolamento entre a cobertura e a seção retangular, lanternim do tipo “chapéu chinês”. O duto para carregamento do silo foi construído com chapa galvanizada. Os detalhes de construção são mostrados na Figura 3.4.

No protótipo, foi instalado um painel de controle, que abriga os instrumentos de aquisição de dados e controladores de velocidade do ventilador e da esteira transportadora.

O mecanismo de escoamento é gravitacional, com controle de fluxo vertical nos dutos de descarga do silo graneleiro e com vazão controlada por comportas reguláveis que, por meio de uma correia transportadora, pode-se escoar o produto com velocidade constante (Figura 3.5).

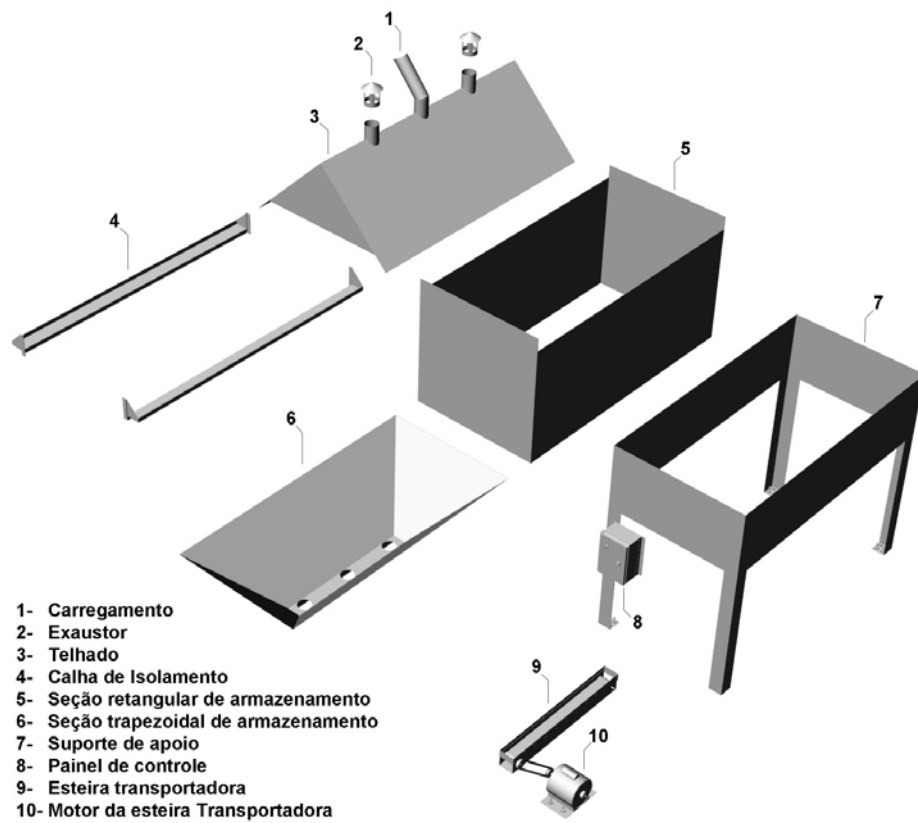


Figura 3.4 – Desenho esquemático do protótipo do silo graneleiro.

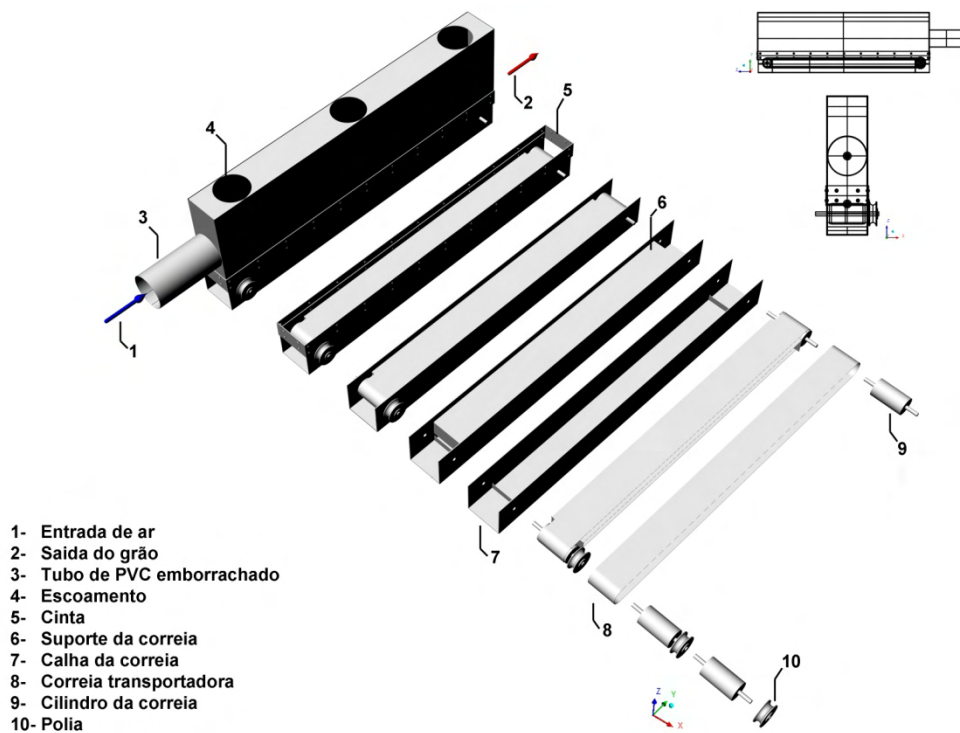


Figura 3.5 – Desenho esquemático da correia transportadora.

A entrada de ar forçada pela tubulação interna localizada acima da esteira transportadora é realizada por meio de um ventilador centrífugo (Figura 3.6).

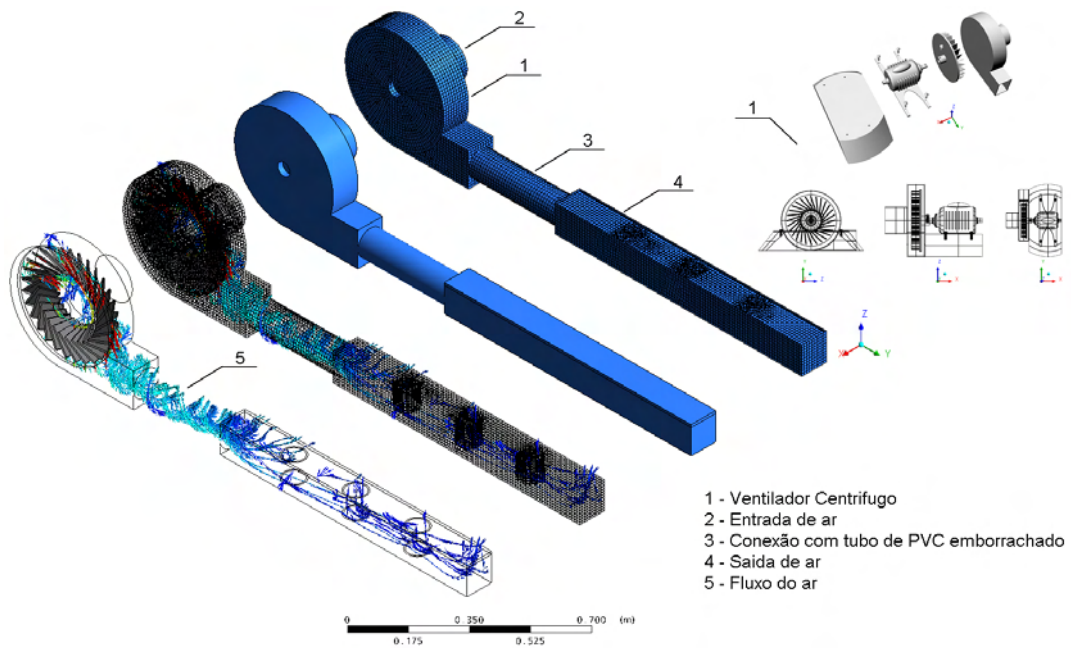


Figura 3.6 – Representação do campo vetorial de velocidade nos planos x-y-z e desenho esquemático do ventilador centrífugo na entrada de ar do protótipo.

O protótipo possui um componente para adaptação e, ou, substituição do ventilador centrífugo por um axial, como mostrado na Figura 3.7.

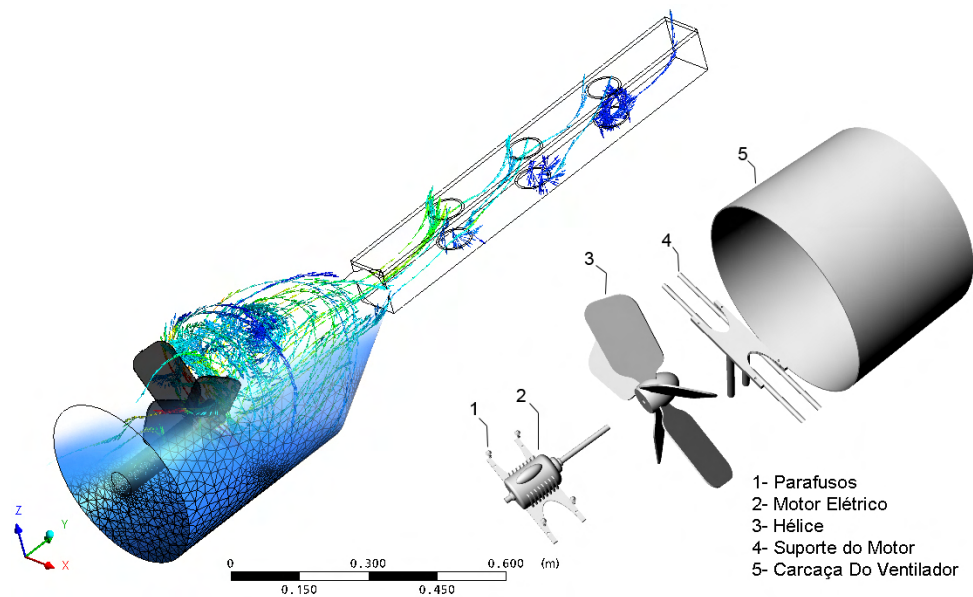


Figura 3.7 – Representação do campo vetorial de velocidade nos planos x-y-z e desenho esquemático do ventilador axial na entrada de ar do protótipo.

Como não há padrão de tamanho para silos graneleiros no Brasil, as dimensões do modelo foram representativas das escalas de capacidades de silos comumente encontrados no mercado, segundo apresentado por Luymes (1985) e Canada Plan Service (2005).

Os testes foram realizados com o escoamento do ar no protótipo geometricamente e dinamicamente semelhante ao de um silo em escala real (Fox et al., 2006). Para assegurar essa semelhança das características do escoamento do ar no protótipo e em escala real, o regime de escoamento, expresso pelo número de Reynolds, deve ser igual nos dois casos. Portanto, tem-se:

$$[Re]_{\text{modelo}} = [Re]_{\text{real}} \quad (3.2)$$

$$\left(\frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \right)_{\text{real}} \quad (3.3)$$

em que:

- Re - Número de Reynolds, (adimensional);
- L - Comprimento característico descritivo da geometria do campo de escoamento, (m);
- ρ - Massa específica do ar, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
- v - Velocidade de escoamento do ar no duto, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
- μ - Viscosidade do ar, ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

A análise dimensional é um método simples, claro e intuitivo para determinar as dependências funcionais de grandezas físicas importantes para um determinado processo, possibilitando a redução do número de variáveis do problema analisado (Schwab et al., 1992).

A análise dimensional do protótipo do silo graneleiro foi realizada com as unidades para os parâmetros apresentados na Tabela 3.2 (Buckingham, 1914; Murphy, 1950) e, posteriormente, foi feita a análise dimensional por meio do Teorema- π de Buckingham pelo conjunto Π de adimensionais, conforme

Tabela 3.3 e apresentado no **Apêndice A** (Murphy, 1950; Fox et al., 2006; Giovanni, 2011; Vekariya et al., 2011).

Tabela 3.2 – Parâmetros dimensionais

Quantidade	Parâmetros	Sistema Internacional	Dimensões (LTM θ)
Altura	H	m	L
Calor	Q	kg·m ² ·s ⁻²	ML ² T ⁻²
Calor Específico	C _p	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹	L ² T ⁻² θ ⁻¹
Coeficiente de Expansão	β_e	K ⁻¹	θ ⁻¹
Coeficiente de Transferência de Calor	\bar{h}_c	kg·s ⁻³ ·K ⁻¹	MT ⁻³ θ ⁻¹
Condutividade Térmica	k	kg·m·s ⁻³ ·K ⁻¹	MLT ⁻³ θ ⁻¹
Diâmetro Hidráulico ¹	D _h	m	L
Gravidade	g	m·s ⁻²	LT ⁻²
Massa Específica	ρ	kg·m ⁻³	ML ³
Variação de Temperatura	ΔT	K	θ
Velocidade	V	m·s ⁻¹	LT ⁻¹
Viscosidade	μ	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹	ML ⁻¹ T ⁻¹

Notas: 1 Também conhecido como “Raio Hidráulico” é um parâmetro usado para estimar o raio com seções não circulares. Consiste na razão entre a área da seção transversal (A) e o perímetro (P). (Lin et al., 2007)

Tabela 3.3 – Conjunto Π de adimensionais

Conjunto Π	Equação Adimensional
Π_1	$Q \cdot \rho^{-1} \cdot V^{-2} \cdot D_h^{-3}$
Π_2	$H \cdot D_h^{-1}$
Π_3	$C_p \cdot \Delta T \cdot V^{-2}$
Π_4	$\beta_e \cdot \Delta T$
Π_5	$\bar{h}_c \cdot \Delta T \cdot \rho^{-1} \cdot V^{-3}$
Π_6	$k \cdot \Delta T \cdot \rho^{-1} \cdot D_h^{-1} \cdot V^{-3}$
Π_7	$g \cdot D_h \cdot V^{-2}$
Π_8	$\mu \cdot \rho^{-1} \cdot D_h^{-1} \cdot V^{-1}$

3-6.2. Instrumentação e aquisição de dados experimentais

Foi implementado um sistema de aquisição de dados, com monitoramento em tempo real, com base na tecnologia 1-Wire™, utilizando-se dispositivos digitais endereçáveis (Awtrey, 1997; Awtrey, 2002). A Figura 3.8 contém um esquema simplificado da rede de dispositivos da série 1-Wire™ para aquisição e transmissão de dados (Monte et al., 2008).

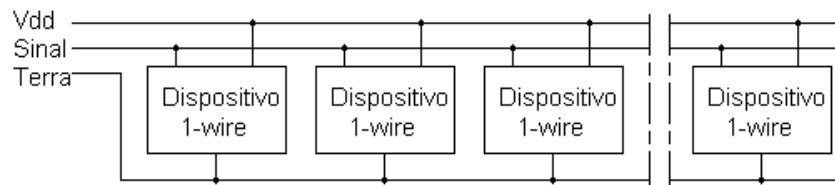


Figura 3.8 – Representação esquemática de uma rede 1-Wire™ para aquisição e transmissão de dados.

A utilização deste tipo de rede para aquisição de dados torna-se interessante, uma vez que reduz custos com instrumentação, pois não é necessário utilizar sistema de aquisição de dados convencional. A rede 1-Wire™ utiliza apenas um condutor para transmissão de dados, comum a todos os dispositivos ou instrumentos (escravos ou cliente) ligados à rede, e um computador ou microprocessador (mestre ou servidor) que, por meio de um programa computacional apropriado, gerencia todo o sistema, além de ser técnica e economicamente viável (Steidle Neto et al., 2005; Lopes et al., 2007; Monte et al., 2008; Rocha et al., 2008).

A temperatura e a umidade relativa do ar intergranular foram medidas em 15 (quinze) pontos na massa de grãos. As variáveis referentes às condições do ambiente externo tais como, temperatura, umidade relativa do ar, foram monitoradas.

A Figura 3.9 contém um esquema mostrando a localização dos pontos de medição com o sistema 1-Wire™ no interior do protótipo.

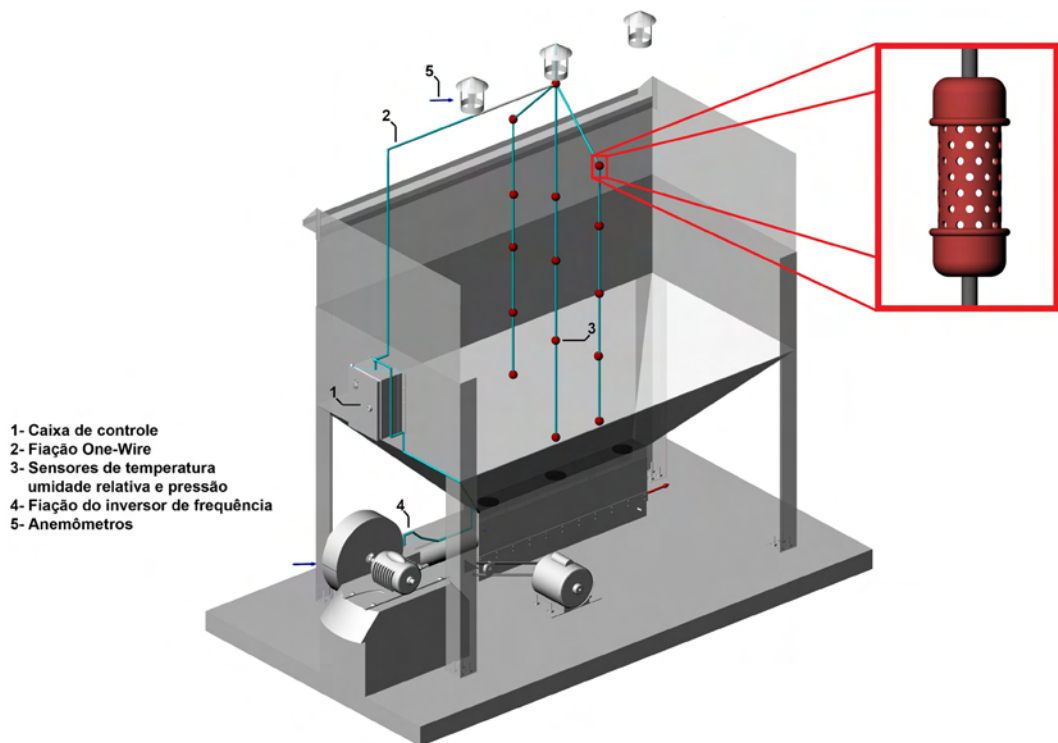


Figura 3.9 – Pontos de instrumentação na massa de grãos.

Foram instalados no interior da massa de grãos circuitos com os sensores de temperatura com tecnologia 1-Wire™ (DS2438) e umidade relativa (HIH4000), individualmente encasulados em tubos de PVC com diâmetro de 32 mm e 100 mm de comprimento cada, interconectados por um fio blindado de dois pares, com perfurações de diâmetro de 5 mm na região do tubo onde se encontrava os sensores para permitir circulação de ar em torno dos deles, como ilustrado na Figura 3.10.

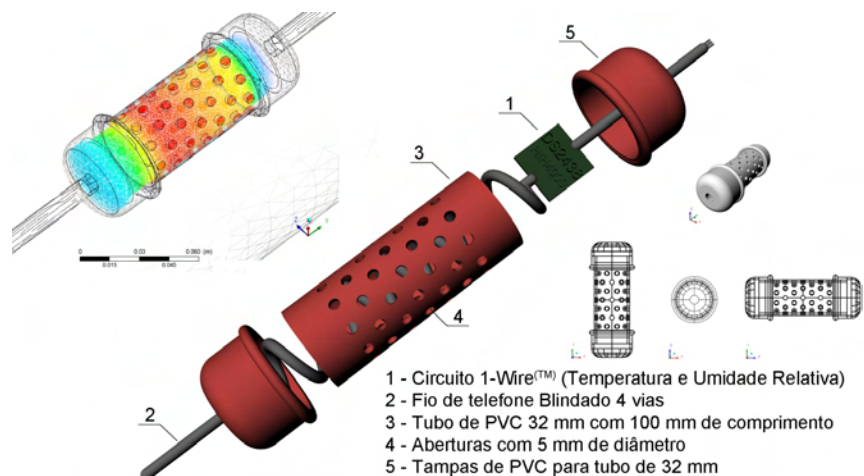


Figura 3.10 – Representação esquemática do encasulamento dos sensores de temperatura e umidade relativa.

Os fios de interconexão e os encasulamentos foram presos a cabos de aço recobertos com capa de PVC transparente com diâmetro de 3,2 mm e fixado entre o fundo trapezoidal e a cobertura do protótipo, mantendo a mesma distância entre os sensores e as camadas de análise, como ilustrado na foto mostrada na Figura 3.11.

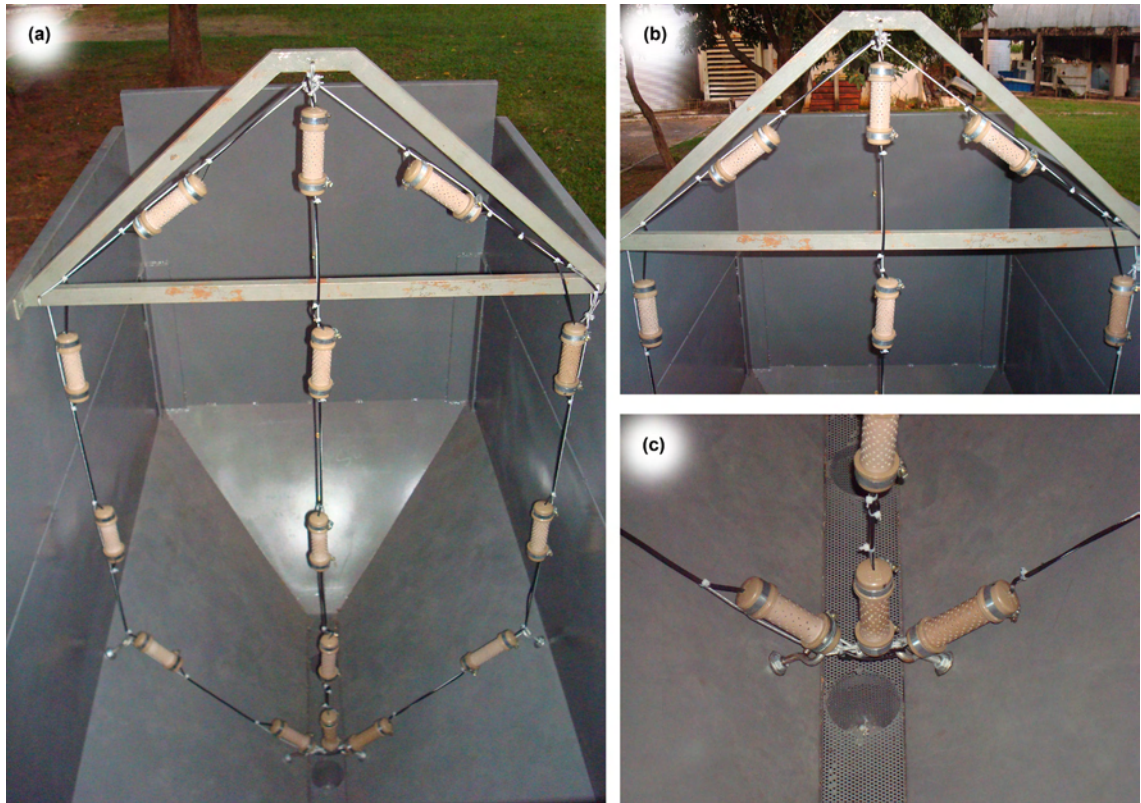


Figura 3.11 – Disposição e fixação dos sensores de temperatura e umidade relativa utilizando-se cabo de aço: (a) rede formada no centro do protótipo; (b) na cobertura do protótipo; (c) no fundo trapezoidal.

3-7. REFERÊNCIAS

- ANSYS Inc. **ANSYS CFX 11.0 - Technical Specifications**. Contract Holder (2007).
- Awtrey, D. **Transmitting Data and Power over a One Wire Bar**. Dallas Semiconductor, Sensors Magazine (1997).
- Awtrey, D. **1-Wire Addressable Digital Instruments for Environmental Monitoring**. Dallas Semiconductor, Sensors Magazine (2002).
- Buckingham, E. **On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations**. Physical Review 4(4): 345 (1914).
- Canada Plan Service. **Above-Ground Horizontal Silo**. Plan-M-7435(88:08): 3 (2005).
- Coelho, M. P. *Simulação do processo de resfriamento de grãos usando a mecânica dos fluidos computacional*. Departamento de Engenharia Agrícola. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa - UFV. Mestrado (2009).
- Fox, R. W.; McDonald, A. t.; Pritchard, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro, LTC (2006).
- Franca, A. S.; Fortes, M.; Haghghi, K. **Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials**. Drying Technology 12(7): 1537-1560 (1994).
- Giovanni, M. **The power of dimensional analysis in production systems design**. International Journal of Production Economics 131(1): 175-182 (2011).
- Lin, J. H.; Huang, C. Y.; Su, C. C. **Dimensional analysis for the heat transfer characteristics in the corrugated channels of plate heat exchangers**. International Communications in Heat and Mass Transfer 34(3): 304-312 (2007).
- Lopes, D. C.; Martins, J. H.; Monteiro, P. M. B.; Queiroz, D. M. **Redes 1-Wire aplicadas à aeração de grãos armazenados**. Acta Scientiarum. Agronomy 29(2) (2007).

- Luymes, J. ***Farm Structures Factsheet: Sizing Horizontal Silos***. British Columbia(372.302-3) (1985).
- Monte, J. E. C.; Martins, J. H.; Lopes, D. C.; Monteiro, P. M. B.; Pinto, P. R. ***Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina***. Acta Scientiarum 30 (3) (2008).
- Murphy, G. ***Similitude in engineering***. New York, Ronald Press Co. (1950).
- Oliveira, J. S. e.; Martins, C. E. ***Tipos de Silos***. Embrapa - Agronegócio do leite (2009).
- Rocha, K. S. O.; Martins, J. H.; Tinôco, I. F. F.; Melo, E. C.; Lopes, D. C.; Hermsdorff, W. ***Remote environmental monitoring and management of data systems***. Livestock Environment VIII - Proceedings of the 8th International Symposium, Iguassu Falls (2008).
- Schwab, C. V.; Thompson, S. A.; Williams, R. A.; Ross, I. J. ***Temperature Cable Load Comparison Between Model And Full-Scale Grain Bins***. 35(1): 297-302 (1992).
- Steidle Neto, A. J.; Baêta, F. C.; Martins, J. H.; Zolnier, S.; Monteiro, P. M. B. ***Avaliação da transmissão de dados de temperatura no sistema 1-wireTM***. Engenharia Agrícola 25: 29-36 (2005).
- Vekariya, P.; Subbaiah, R.; Mashru, H. ***Hydraulics of microtube emitters: a dimensional analysis approach***. Irrigation Science 29(4): 341-350 (2011).
- Xia, B.; Sun, D. W. ***Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review***. Computers and Electronics in Agriculture 34(1-3): 5-24 (2002).

CAPÍTULO 4

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA RESPOSTA EM REGIME TRANSIENTE DE SENSORES DE TEMPERATURA E DE UMIDADE RELATIVA COM E SEM INVÓLUCRO DE PROTEÇÃO

RESUMO

Com base na necessidade de proteção de sensores de temperatura e de sensores de umidade relativa do ar instalados em ambientes hostis, um túnel de vento foi utilizado para quantificar o tempo que estes sensores demoram em atingir o equilíbrio com as condições do ambiente onde eles foram instalados. Dois tratamentos foram utilizados: (1) os sensores com invólucro de proteção construído de material de policloreto de vinila (PVC), e (2) sensor sem invólucro de proteção. Os principais objetivos neste estudo foram desenvolver e validar um modelo em três dimensões (3-D) utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para analisar a distribuição de temperatura e de umidade relativa do ar em um túnel de vento utilizando sensores protegidos com invólucro de cloreto de polivinila (PVC), e sensores sem esta proteção. Um modelo de simulação em CFD foi desenvolvido para descrever a distribuição de temperatura e da física de transferência de massa relacionada com a umidade relativa do fluxo de ar. Os primeiros resultados comprovam a aplicabilidade da simulação. Para verificação, um dispositivo sensor foi montado e testado com sucesso em um ambiente de teste, otimizado para garantir condições rápidas mudanças. A configuração para quantificação apresentada neste artigo é, portanto, considerada adequada para testar diferentes materiais e morfologia para invólucros de proteção de sensores. Os resultados mostram que o fluxo na camada limite tem impacto significativo sobre a distribuição de fluxo de calor. Os resultados indicam que a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) é uma ferramenta poderosa que fornece uma descrição detalhada do fluxo e os campos de temperatura, bem como o tempo em que as variáveis demoram para atingir o equilíbrio com o ambiente onde os sensores são inseridos.

PALAVRAS CHAVE: invólucro, CFD, sensores digitais, monitoramento de processos

***MODELING AND SIMULATION OF TRANSIENT RESPONSE OF
TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY SENSORS WITH
HOUSING AND WITHOUT IT***

SUMMARY

Based on the necessity of enclosure protection of temperature and relative humidity sensors installed in hostile environment, a wind tunnel was used for quantifying the time that the sensors take to reach the equilibrium with environment conditions they are inserted in. Two treatments were used: (1) sensors with polyvinyl chloride (PVC) enclosure protection, and (2) sensors with no enclosure protection. The primary objectives in this study were to develop and validate a 3-D CFD model for analyzing the temperature and relative humidity distribution in a wind tunnel using sensors with polyvinyl chloride (PVC) enclosure protection, and sensors with no enclosure protection. A CFD simulation model was developed to describe the temperature distribution and the physics of mass transfer related to the airflow relative humidity. The first results prove the applicability of the simulation. For verification, a sensor device was successfully assembled and tested in a test environment, optimized to ensure fast changes conditions. The quantification setup presented in this paper is thus considered to be adequate for testing different materials and morphology enclosure protection. The results show that boundary layer flow regime has significant impact on heat flux distribution. The results indicate the usefulness of the Computational Fluid Dynamic (CFD) technique as a powerful tool which provides a detailed description of the flow and temperature fields as well as the time that the relative humidity takes to reach the equilibrium with the environment where the sensors are inserted in.

KEYWORDS: enclosure protection, CFD, digital sensors, process monitoring

4-1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico, com relação aos sistemas de instrumentação e medidas, exige, cada vez mais, meios que proporcionem maior confiabilidade aos dados coletados.

Simulações em dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) estão, cada vez mais, sendo usados para prever várias questões na agricultura e processamento de alimentos (Liu & Peng, 2005; Martins et al., 2010). O desempenho em processos agrícolas ou na agroindústria depende do intercâmbio de calor e água entre o ar e os produtos ou animais e, portanto, sobre a distribuição espacial dos parâmetros do ar tais como: velocidade, turbulência, temperatura e umidade relativa.

A utilização do invólucro em sensores de temperatura e umidade relativa contra danos por influências físicas e ambientais em processos agrícolas é normalmente exigida. Um dos principais problemas da utilização de invólucro em sensores de temperatura e umidade relativa é o atraso no tempo de equilíbrio com o meio (tempo de resposta), afetando a sua precisão.

Como primeiro passo, foi realizado experimentos em túnel de vento e simulações em CFD para prever as distribuições de temperaturas e umidade relativa em um escoamento não-isotérmico.

4-2. METODOLOGIA

Os resultados foram obtidos a partir do modelo de turbulência padrão $k-\varepsilon$ e o modelo da equação de transferência de calor foi comparado com os do experimento em túnel de vento.

A fim de se obter mais conhecimentos sobre a transferência de calor e massa em estruturas de invólucros em materiais de PVC e analisar o comportamento dos sensores de temperatura e umidade relativa mais profundamente, foram realizadas simulações do modelo baseados na Dinâmica de Fluidos Computacionais (CFD) por meio dos quais se podem conhecer a distribuição de temperatura e umidade relativa em regime transiente nos pontos de observação e comparado com os resultados obtidos em um túnel de vento.

Um pequeno túnel de vento com 200 mm de diâmetro e 500 mm de altura foi projetado para fornecer um fluxo laminar com velocidade entre $0,5$ e $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Neste estudo foi investigada a troca de calor e a transferência de massa entre o ambiente e o invólucro, dividido em duas partes. A primeira parte trata do estudo da interface entre o meio fluido (ar) externo e interno ao invólucro. A segunda trata da análise de um fluxo de fluido (ar) com velocidade constante em alta temperatura ($77,5^\circ\text{C}$), externo ao invólucro.

As medições foram realizadas no ponto mais próximo ao centro externo ao invólucro e no ponto central no interior dele, como ilustrado na Figura 4.1. O número de Reynolds (Re) nestes pontos é, aproximadamente, igual a 553 e 7,85, respectivamente, e pode ser descrito pelas equações de Navier-Stokes.

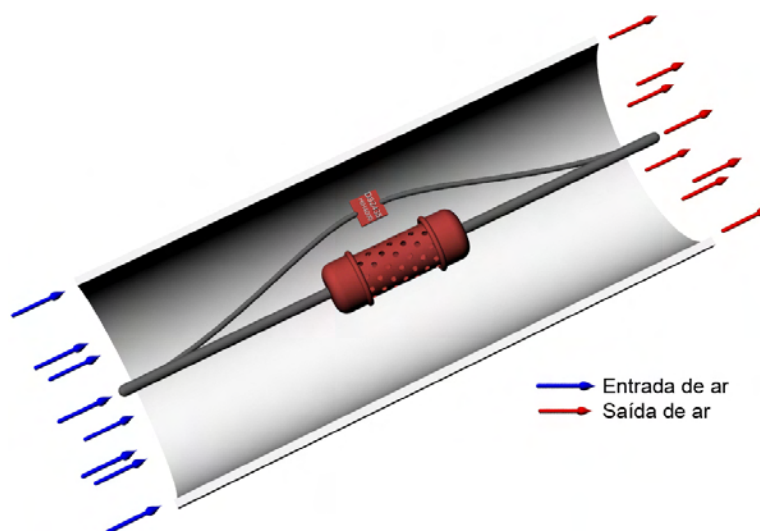


Figura 4.1 – Representação esquemática do túnel de vento e da localização dos sensores de temperatura e de umidade relativa com e sem invólucro de proteção.

4-2.1. Condições operacionais

Foi implementado um sistema de aquisição de dados, com monitoramento em tempo real, com base na tecnologia 1-WireTM, utilizando-se dispositivos digitais endereçáveis (Awtrey, 1997; Awtrey, 2002).

A utilização deste tipo de rede para aquisição de dados torna-se interessante, uma vez que reduz custos com instrumentação, pois não é

necessário utilizar sistema de aquisição de dados convencional. A rede 1-Wire™ utiliza apenas um condutor para transmissão de dados, em comum com todos os dispositivos ou instrumentos (escravos) ligados à rede, e um computador ou microprocessador (mestre) que, por meio de um programa computacional apropriado, gerencia todo o sistema, além de ser técnica e economicamente viável (Steidle Neto et al., 2005; Lopes et al., 2007; Monte et al., 2008; Rocha et al., 2008).

A temperatura e a umidade relativa do ar no túnel de vento foram medidas em dois pontos centralizados, em que no primeiro ponto encontrava-se instalado um sensor com invólucro e no outro um sensor sem invólucro. A taxa de fluxo de ar foi mantida constante na entrada do sistema. As variáveis, referentes às condições do ambiente externo tais como temperatura e umidade relativa do ar, foram monitoradas com um sensor sem invólucro.

O invólucro do circuito com o sensor de temperatura com tecnologia 1-Wire™ (DS2438) e umidade relativa (HIH4000) no interior do túnel de vento foi construído em tubo de PVC com diâmetro de 32 mm e 100 mm de comprimento cada, com perfurações de 5 mm de diâmetro para permitir circulação de ar em torno dos sensores, interconectados por um fio blindado de dois pares, como ilustrado na Figura 4.2.

O sistema adotado para a aquisição de dados experimentais com o uso do protocolo 1-Wire™ foi baseado no sistema STRADA (Rocha et al., 2008).

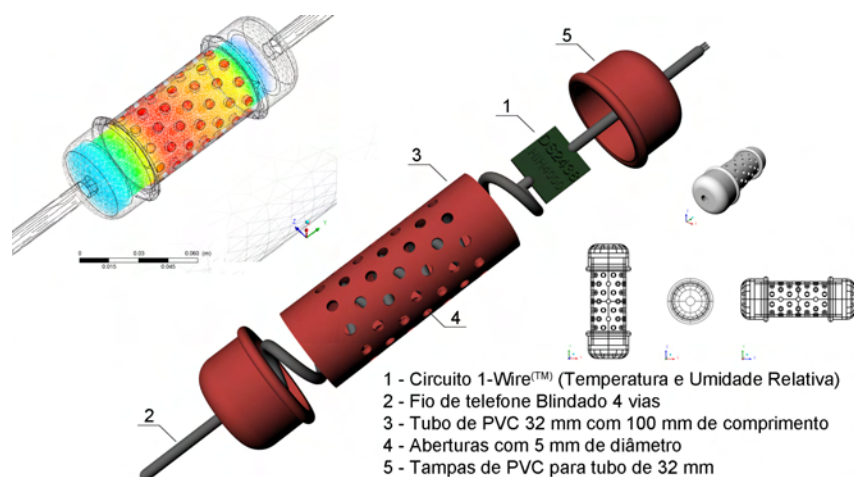


Figura 4.2 – Representação esquemática do invólucro dos sensores de temperatura e de umidade relativa.

4-2.2. Aquisição dos dados experimentais

Foram utilizados sensores da tecnologia 1-Wire™ para determinar a temperatura e a umidade relativa do ar. Dois sensores (um com invólucro e outro sem invólucro) foram instalados no interior do túnel de vento, e o terceiro sensor localizado na parte externa dele para monitoramento das condições do ambiente externo. Os sensores foram interconectados a um fio de telefone blindado de quatro vias para constituição da rede de transmissão de dados com base na tecnologia 1-Wire™ (Lopes et al., 2007).

Os dados de temperatura e umidade relativa foram registrados em arquivos no formato de texto com uma resolução de $0,5^{\circ}\text{C} \pm 1,0\%$. A velocidade do fluido (ar) no túnel de vento foi fixada em $0,62\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a uma temperatura de $77,5^{\circ}\text{C}$. No início da coleta de dados a temperatura média no ambiente externo era de 23°C e a umidade relativa do ar igual a 65%.

4-2.3. Modelo computacional

Devido à complexidade da geometria do invólucro, o programa computacional ANSYS ICEM CFD foi utilizado para construção de uma malha computacional tetraédrica do objeto em estudo.

O elemento de volume tetraédrico é muito útil para manter a alta qualidade da malha para uma região articuladamente complexa em diferentes formas da geometria a ser moldada na região de interesse, mesmo que ele exija mais nós do que os elementos da malha hexaédrica e resulte em um tamanho de arquivo e tempo computacional maior (Lee et al., 2007; Katz & Sankaran, 2011).

4-2.4. Condições de contorno

Os resultados obtidos por meio da simulação utilizando-se dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) foram verificados e comparados com os dados correspondentes obtidos experimentalmente no túnel de vento.

Os valores medidos e obtidos experimentalmente no túnel de vento foram usados para atribuir as condições de contorno do modelo. Assim, é necessário fornecer os valores iniciais das variáveis, tais como umidade

relativa e temperatura do ar interno e externo ao invólucro, calcular os termos de umidade relativa e temperatura para cada passo no tempo e resolver as equações de conservação de energia, massa e momento.

A técnica de CFD foi utilizada para resolver as equações de Navier-Stokes escritas com os campos médios de velocidades e de energia, quantificando os campos de temperatura e de velocidade pelo método de volumes finitos (Tu et al., 2008; Vaz et al., 2011). Estas equações são apresentadas a seguir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.2)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + P)) = \nabla \cdot \left(\kappa_{ef} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{ef} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (4.4)$$

$$E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (4.5)$$

$$h = \sum Y_j h_j + \frac{P}{\rho} \quad (4.6)$$

$$h_j = \int_{T_r}^T c_{pj} dT \quad (4.7)$$

em que:

- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$);
- h_m - Coeficiente de transferência de massa, ($m \cdot s^{-1}$);
- P - Pressão, (Pa);
- T - Temperatura, (K);
- t - Tempo, (s);
- ε - Taxa de dissipação de flutuações de velocidade, ($m^2 \cdot s^{-3}$)

- k - Coeficiente de turbulência de energia cinética, $(m^2 \cdot s^{-2})$
- $\rho \bar{g}$ - Força gravitacional do corpo por unidade de volume, $(N \cdot m^{-3})$
- S_m - Massa adicionada na fase contínua, $(kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1})$
- S_n - Massa adicionada ou removida pela fase contínua, $(kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1})$
- \bar{F} - Forças externas de corpo por unidade de volume, $(N \cdot m^{-3})$
- E - Energia específica, $(J \cdot kg^{-1})$
- \bar{J}_j - Fluxo difusivo da espécie j , $(kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1})$
- ρ - Massa específica, $(kg \cdot m^{-3})$
- μ_τ - Viscosidade dinâmica do fluido, $(kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$
- $\bar{\tau}$ - Tensor de tensões, $(N \cdot m^{-2})$
- I - Tensor unitário,
- \bar{V} - Vetor velocidade de fluxo, $(m \cdot s^{-2})$
- κ_{ef} - Condutividade térmica efetiva, $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$

O tensor de Reynolds foi modelado utilizando-se o modelo de turbulência standard $k-\varepsilon$, que avalia a viscosidade (μ_τ) a partir da relação entre a energia cinética de turbulência (k) e a dissipação de energia cinética de turbulência (ε).

Depois da exposição dos sensores ao fluxo de ar por um período de tempo específico para um determinado nível de umidade do ar, é atingido um valor de umidade relativa que depende da temperatura e da quantidade de água contida no ar, chegando ao equilíbrio.

A umidade relativa é uma medida da quantidade de água contida no ar, definida pela razão entre a pressão de vapor de água na atmosfera e a pressão de vapor saturado à mesma temperatura, geralmente expressa em percentagem.

$$U_r = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \cdot 100 \quad (4.8)$$

em que:

- U_r - Umidade relativa, decimal ou %
- P_v - Pressão de vapor de água, Pa
- P_{vs} - Pressão de vapor de água saturado, Pa

A relação empírica entre a pressão de vapor de saturação e a temperatura é dada pela seguinte equação (Hunter, 1987):

$$P_{vs} = \frac{6 \cdot 10^{25}}{(T + 273,15)^5} \cdot \exp\left(-\frac{6800}{T + 273,15}\right) \quad (4.9)$$

O programa computacional ANSYS CFX[®] foi utilizado para implementar o modelo proposto com as seguintes pressuposições:

- (1) Transporte em estado transiente.
- (2) Escoamento incompressível.

Um resíduo com valor menor que 10^{-4} foi adotado como critério de convergência.

4-2.5. Validação do modelo computacional

As variáveis foram submetidas aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e, posteriormente, à análise de variância. As comparações entre as repetições independentes foram realizadas por análise de variância para dados com distribuição normal e pelo teste não paramétrico de Kruskal Wallis para os dados sem distribuição normal.

Depois das transformações apropriadas, os dados foram submetidos ao teste não-paramétrico, utilizando-se o programa SigmaPlot[®], versão 12.0-Systat[®] Software, Inc (Wass, 2009), para análise estatística e representação dos dados. O valor de p foi fixado em até 5% com o intuito de obter uma confiabilidade de 95% nas comparações. Os resultados dos dados não paramétricos foram expressos por meio da mediana.

4-3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste artigo, foi utilizado o software ICEM ANSYS™ para gerar as malhas. Foi criada uma malha tetraédrica com um total de 356654 volumes compostos por dois domínios distintos, sendo um formado pelo fluido confinado no invólucro e outro pelo fluido não confinado, constituídos por 217069 e 139585 volumes finitos, respectivamente, e interconectados por uma interface do tipo fluido-fluido nas aberturas no tubo de PVC. Para cada face de cada domínio foram estabelecidas as condições de contorno como apresentado na Figura 4.3.

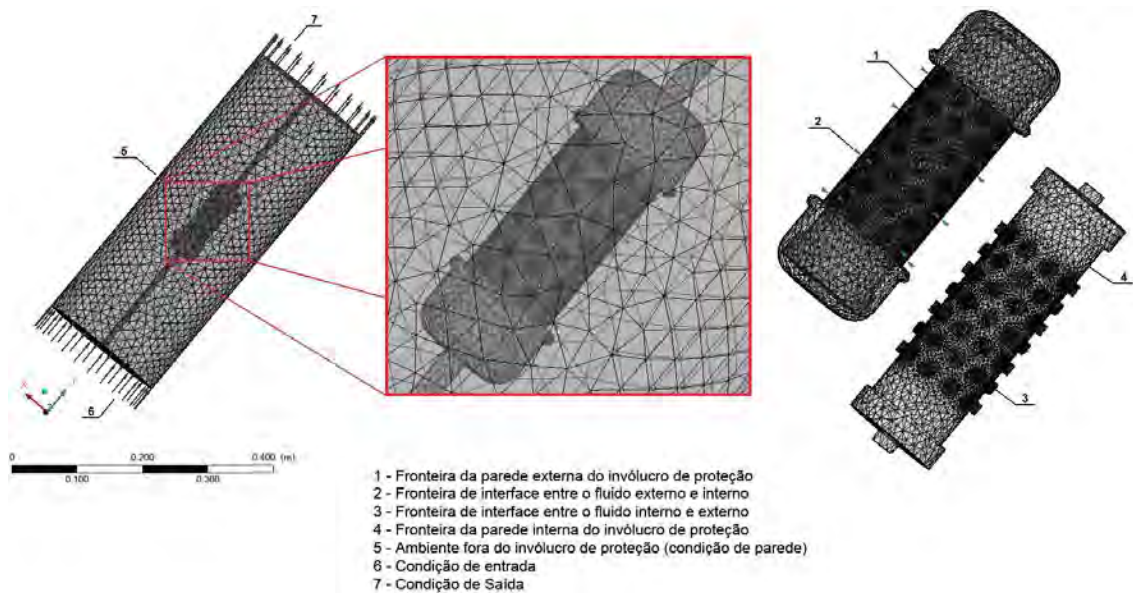


Figura 4.3 – Detalhe de refinamento da malha computacional tetraédrica.

Durante o período estudado (1140 s), observou-se que o tempo de equilíbrio para temperatura e umidade relativa entre o sensor com invólucro e sem invólucro diferiram em 1020 e 540 segundos, respectivamente, com uma variação de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1,0\%$, como apresentados na Figura 4.4 (A e B) e na Figura 4.5.

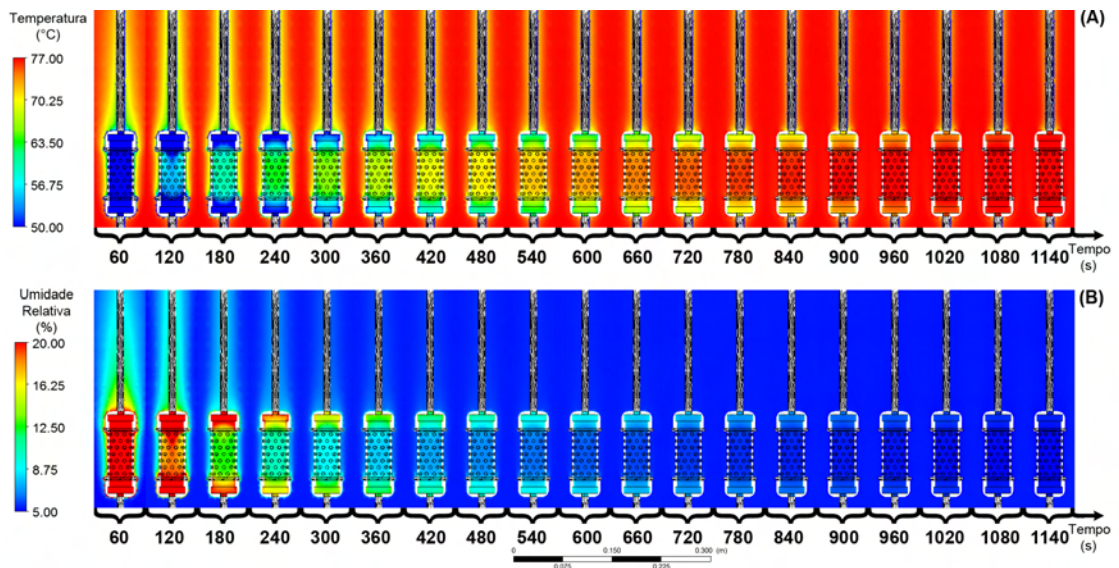


Figura 4.4 – (A) Representação da variação de temperatura; (B) representação da variação de umidade relativa.

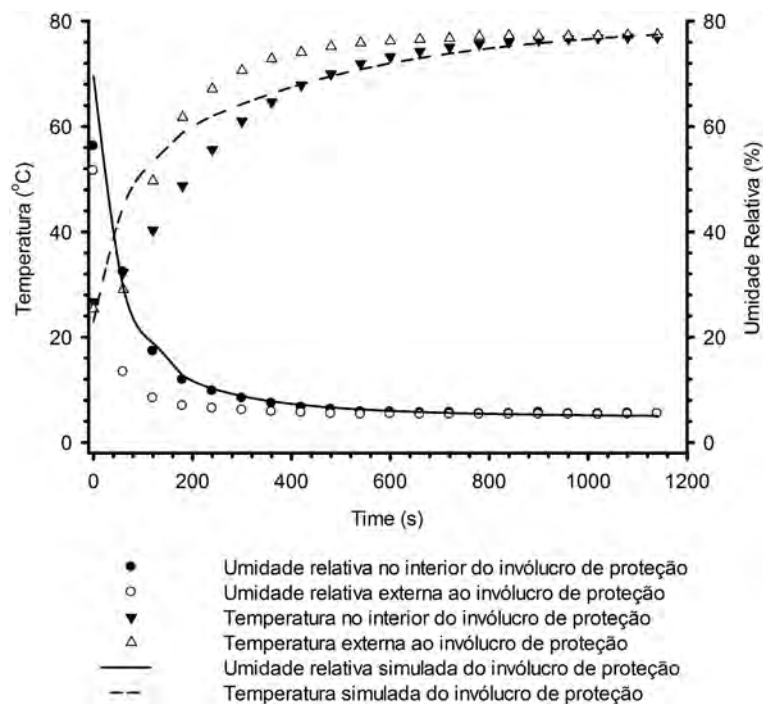


Figura 4.5– Simulação do estado transiente da temperatura e umidade relativa para os sensores com invólucros.

As diferenças nos valores medianos entre os grupos de variáveis do processo foram maiores do que o esperado, havendo uma diferença estatisticamente significativa com nível de significância $p \leq 0,001$, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 4.1 - Média dos grupos de variáveis do processo para os sensores com invólucros e sem invólucros

Variáveis	Média
Umidade relativa no interior do invólucro de proteção	10,898 ± 12,420 ^a
Umidade relativa externa ao invólucro de proteção	8,420 ± 10,334 ^b
Temperatura no interior do invólucro de proteção	64,865 ± 15,852 ^c
Temperatura externa ao invólucro de proteção	68,597 ± 15,735 ^d
Umidade relativa simulada no interior invólucro de proteção	11,569 ± 14,881 ^a
Temperatura simulada no interior invólucro de proteção	66,679 ± 13,456 ^c

^{abcd} Valores (média ± DP) seguidos da mesma letra, na linha, não diferem significativamente entre si, pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Uma correlação significativa foi identificada entre a temperatura no interior do invólucro e a temperatura simulada e entre a umidade relativa no interior do invólucro e a umidade relativa simulada, observada pelo coeficiente de determinação $R^2 > 0,99$, como mostrado na Figura 4.6.

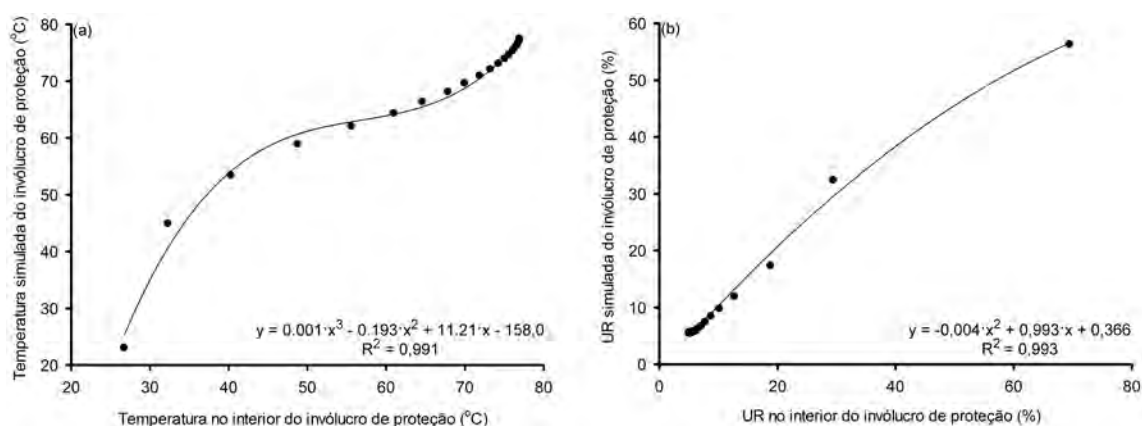


Figura 4.6 – (a) Correlação entre a temperatura no interior do invólucro e a temperatura simulada; (b) correlação entre a umidade relativa no interior do invólucro e a umidade relativa simulada.

4-4. CONCLUSÕES

Por ser um material de alta resistência e de baixo custo os tubos de PVC tornam-se apropriados para o invólucro de sensores em experimentos que oferecem ambientes ou situações hostis, em que não seja permitida a sua exposição direta.

Os resultados simulados de temperatura e umidade relativa apresentam uma boa correlação com os dados experimentais ($R^2 > 0,99$), o que permite concluir que o modelo é apropriado para prever e aperfeiçoar sistemas de invólucro de sensores utilizando material em PVC.

O tempo médio de equilíbrio entre os sensores de temperatura e umidade relativa com invólucros e sem invólucros encontram-se entre 1020 e 540 segundos com uma variação de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ e $\pm 1,0\%$, respectivamente.

Esta metodologia pode ser usada como base para dimensionamento inicial de novas morfologias e geometrias de invólucros, com objetivo de otimizar o fluxo de ar no interior do invólucro e diminuir o tempo de resposta (equilíbrio) do sensor.

4-5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal de Viçosa – UFV pela grande oportunidade.

4-6. REFERÊNCIAS

- Awtrey, D. ***Transmitting Data and Power over a One Wire Bar***. Dallas Semiconductor, Sensors Magazine (1997).
- Awtrey, D. ***1-Wire Addressable Digital Instruments for Environmental Monitoring***. Dallas Semiconductor, Sensors Magazine (2002).
- Hunter, A. J. ***An isostere equation for some common seeds***. Journal of Agricultural Engineering Research 37(2): 93-105 (1987).
- Katz, A.; Sankaran, V. ***Mesh quality effects on the accuracy of CFD solutions on unstructured meshes***. Journal of Computational Physics 230(20): 7670-7686 (2011).
- Lee, I. B.; Sase, S.; Sung, S. H. ***Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house***. Japan Agricultural Research Quarterly 41(1): 53-64 (2007).
- Liu, S. X.; Peng, M. ***Verification of mass transfer simulation with CFD using highly accurate solutions***. Computers and Electronics in Agriculture 49(2): 309-314 (2005).
- Lopes, D. C.; Martins, J. H.; Monteiro, P. M. B.; Queiroz, D. M. ***Redes 1-Wire aplicadas à aeração de grãos armazenados***. Acta Scientiarum. Agronomy 29(2) (2007).
- Martins, M. A.; Oliveira, L. S. d.; Saraz, J. A. O. ***Numerical study of apple cooling in tandem arrangement***. Revista de la Faculdade de Minas - DYNA (2010).
- Monte, J. E. C.; Martins, J. H.; Lopes, D. C.; Monteiro, P. M. B.; Pinto, P. R. ***Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina***. Acta Scientiarum 30 (3) (2008).
- Rocha, K. S. O.; Martins, J. H.; Tinôco, I. F. F.; Melo, E. C.; Lopes, D. C.; Hermsdorff, W. ***Remote environmental monitoring and management of data systems***. Livestock Environment VIII - Proceedings of the 8th International Symposium, Iguassu Falls (2008).

- Steidle Neto, A. J.; Baêta, F. C.; Martins, J. H.; Zolnier, S.; Monteiro, P. M. B. ***Avaliação da transmissão de dados de temperatura no sistema 1-wireTM***. Engenharia Agrícola 25: 29-36 (2005).
- Tu, J.; Yeoh, G. H.; LIU, C. ***Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach***, Butterworth-Heinemann (2008).
- Vaz, J.; Sattler, M. A.; Santos, E. D.; Isoldi, L. A. ***Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger***. Energy and Buildings 43(9): 2476-2482 (2011).
- Wass, J. A. ***SigmaPlot 11: Now with total sigmaStat integration***. Scientific Computing 26(1): 21-23 (2009).

CAPÍTULO 5

MODELAGEM E SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM MEIOS POROSOS: UMA APLICAÇÃO PARA MILHO ARMAZENADO EM SILOS GRANELEIROS

RESUMO

Quando grãos são armazenados, se a umidade relativa e temperatura do ar no interior da massa granular excedem certo limiar, a atividade de microorganismos tende a aumentar. A baixa umidade relativa e temperatura, quando uniformemente distribuídos dentro da massa de grãos, evitam a migração de umidade e o aumento de atividade de microorganismos. Para resfriar ou manter a temperatura da massa de grãos abaixo de um valor limite, ventilação forçada pode ser usada para remover o excesso de umidade ou calor, eventualmente causado pela respiração do próprio grão ou de microorganismos, quando o fluxo de ar utilizado na ventilação é adequado. Portanto, o objetivo neste trabalho foi resolver as equações que descrevem a conservação de calor, massa e momentum para prever os processos de transferência de calor e de massa dentro da massa de grãos de milho armazenada em um protótipo de silo graneleiro e para o ambiente externo. Um modelo tridimensional implementado em dinâmica de fluidos computacional foi utilizado para resolver as equações. A análise de transferência de calor e massa foi realizada considerando a geometria do protótipo e uma malha hexahédrica foi gerada para a análise em volumes finitos. A malha numérica foi definida para discretizar o domínio do fluxo físico de interesse para calcular a temperatura, velocidade e distribuição da umidade na massa de grãos armazenados. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais.

PALAVRAS CHAVE: Armazenamento de grãos; modelagem CFD; volumes finitos; Transferência de calor e massa; processo de resfriamento.

***THREE-DIMENSIONAL MODELING AND SIMULATION OF HEAT
AND MASS TRANSFER PROCESS IN POROUS MEDIA: AN
APPLICATION FOR MAIZE STORED IN A FLAT BIN***

SUMMARY

When grain is stored, if the relative humidity and temperature of the air inside the granular mass exceeds a certain threshold value, microorganisms activity is likely to increase. Lower relative humidity and temperature when uniformly distributed inside the grain mass prevent for moisture migration, and avoid microorganisms' activity to increase. To cool down or maintain the temperature of the grain mass below a threshold value, forced ventilation can be used to remove the excess of moisture or heat eventually caused by the proper grain or microorganisms' respiration, when the airflow used in the ventilation is appropriate. Therefore, the objective in this work was to solve the equations that describe the conservation of heat, mass, and momentum to predict the heat and mass transfer processes inside a grain mass environment of maize, stored in a flat bin. Three-dimensional computational fluid dynamics was used to solve the equations. The analysis of heat and mass transfer was performed considering the geometry of a 2 tons bin's prototype using hexahedral mesh for the analysis in finite-volume. The numerical grid was defined to discretize the physical flow domain of interest to calculate velocity, temperature and moisture distribution in the bulk of stored grain. The predicted results were compared with experimental data. It was concluded that the agreement between them was very good.

KEYWORDS: Grain storage; CFD Modeling; Finite-volume; Heat and mass transfer; Cooling process.

5-1. INTRODUÇÃO

A produção de grãos cresce anualmente de forma acentuada devido ao aumento de produtividade das culturas proporcionado pela aplicação de tecnologia aos sistemas de produção. Porém, a capacidade de armazenagem no Brasil não tem acompanhado o crescimento das safras, principalmente devido ao elevado custo da infra-estrutura de armazenamento (Nogueira Junior & Tsunechiro, 2005).

A capacidade estática de armazenagem no Brasil, de acordo com o levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, em agosto de 2011, é de, aproximadamente, 139,3 milhões de toneladas, e desse total, 113,8 milhões são referentes ao tipo granel (CONAB, 2011).

A estrutura de armazenamento brasileira está distribuída em 13.719 unidades, sendo 6.722 destinadas à armazenagem a granel (Weber, 2005). Os silos e armazéns graneleiros compreendiam, em média, 72,2 % da capacidade total de armazenagem nas fazendas, em 2004, e os armazéns convencionais a 27,8 %. Na zona rural, excluindo-se as fazendas, esses percentuais eram, respectivamente, de 81,6% e 18,4%, enquanto na zona urbana, a distribuição era semelhante à das fazendas, entre 71,0 % e 29,0 %, respectivamente (Nogueira Junior & Tsunechiro, 2005).

Os silos horizontais (graneleiros) são amplamente utilizados no Brasil e possibilitam recursos de movimentação de carga e descarga mecanizada, como elevadores e correias transportadoras, máquinas de limpeza e secadores, sistemas de aeração e termometria. O aumento de temperatura na massa de produtos armazenados faz aumentar a atividade respiratória do grão, fazendo com que haja maior liberação de calor, de dióxido de carbono (CO₂) e de vapor d'água, induzindo à rápida deterioração do produto armazenado, produzindo grãos ardidos e proporcionando um ambiente ideal para proliferação de insetos e fungos.

As condições propícias para a ocorrência de deterioração do produto armazenado são devidas, principalmente, ao fenômeno de migração de umidade no interior da massa de grãos.

A migração de umidade é induzida pelos gradientes de temperatura na massa de grãos armazenada. Por isso, a temperatura e o teor de água dos grãos são considerados os fatores mais importantes no controle da qualidade durante a armazenagem (Chang & Weng, 2002). Para limitar o crescimento de microorganismos prejudiciais é necessário manter a temperatura e o teor de água do grão em níveis adequados para armazenagem.

A migração de umidade na massa de grãos armazenada é, geralmente, proporcionada pelas variações sazonais diurnas da temperatura ambiente. Para atingir um equilíbrio local com o ar nas vizinhanças, os grãos localizados nas regiões mais quentes perdem umidade, enquanto que os grãos localizados em regiões mais frias ganham umidade. O problema simultâneo de transferência de calor e de massa (migração de umidade) ocorre porque os processos de transferência de calor latente existem de forma heterogênea na massa de grãos, proporcionando uma distribuição de concentração de água e de temperatura na massa de grãos, causando correntes convectivas.

Com o objetivo de resfriar e melhorar as condições de armazenamento de grãos, utilizando ar ambiente, tem sido empregado com sucesso a aeração da massa de grãos quando as condições do ar forem satisfatórias, tanto em horários diurnos como noturnos, em certas épocas do ano. No entanto, há situações em que, para condições de armazenamento adequadas, as condições psicrométricas do ar ambiente não são adequadas para resfriar a massa de grãos.

As condições psicrométricas do ar ambiente podem também não ser suficientes para controlar o auto-aquecimento da massa de grãos armazenados em clima quente, dificultando a preservação da qualidade do produto armazenado. O efeito da temperatura do ar é influenciado pelo nível de atividade de água do produto ou pela umidade relativa do ar atmosférico. Dessa forma, ao considerar as características do ar para aeração, devem-se observar as propriedades selecionadas para suprimir ou prevenir o desenvolvimento de organismos prejudiciais à massa de grãos.

Com temperaturas elevadas ou teores de água acima do recomendado durante o armazenamento, pode ocorrer infestação de pragas e

desenvolvimento de fungos, que danificam os grãos e alteram a sua qualidade, ocasionando perdas qualitativas e quantitativas (Alencar et al., 2009). A maioria das principais espécies de insetos de produtos armazenados não apresenta um desenvolvimento significativo em temperaturas abaixo de 20°C (Brooker et al., 1974; Brooker et al., 1992; Navarro & Noyes, 2001). A aeração com ar refrigerado e com umidade relativa controlada fornece uma alternativa para um resfriamento previsível da massa de grãos sob diversas condições climáticas que são impróprias para a aeração com o ar ambiente. Este tipo de aeração fornece benefício significativo em regiões tropicais e subtropicais.

Em vista do exposto, foi proposto neste trabalho desenvolver, implementar e validar uma metodologia computacional, com base nos processos de transferência de calor e de massa em uma massa de grãos armazenada em silos graneleiros, considerando os mecanismos simultâneos de convecção e de difusão de calor e de massa.

Para a solução do problema de transporte de calor e de massa foi utilizada a Mecânica dos Fluidos Computacional. Por meio dessa técnica, o desempenho dos processos de resfriamento ou aquecimento da massa de grãos armazenada pode ser estudado e melhorado. Esses processos foram estudados por meio da observação do comportamento durante o armazenamento dos grãos sem aeração e, posteriormente, simulados cenários com utilização de um fluxo de ar forçado, que percola a massa de grãos (meio poroso).

Os resultados da simulação durante o armazenamento sem aeração foram comparados aos dados observados para grãos de milho, com o objetivo de validar o modelo implementado em Mecânica dos Fluidos Computacional e caracterizar o transporte de calor e de massa. Este modelo pode ser utilizado em projetos de sistema de monitoramento, assim como caracterização de novos cenários para controle do processo de aeração em silos graneleiros, visando à preservação da qualidade do produto armazenado.

5-2. METODOLOGIA

5-2.1. Considerações gerais

O presente trabalho foi desenvolvido na Área de Energia na Agricultura e na Área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

A fim de analisar o processo de transferência de calor e massa em silos horizontais (graneleiros) o comportamento da temperatura e da umidade relativa no interior de uma massa de grãos armazenada foi analisado por meio de simulação com base na Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD). Os resultados das simulações permitem conhecer a distribuição de temperatura e umidade relativa em regime transiente nos pontos de observação.

Para realização dos testes experimentais, foi construído um protótipo de silo graneleiro dotado de um sistema de monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar intergranular. A temperatura e a umidade relativa do ar no ambiente externo foram monitoradas.

A escolha desse tipo de silo foi devido à sua grande utilização no sistema nacional de armazenagem a granel, ao seu reduzido custo de construção e à sua facilidade de carregamento e descarregamento (Oliveira & Martins, 2009).

O silo foi carregado com 2000 kg de milho com teor de água inicial de 11 % bu, sem aeração. A massa específica aparente do milho era de $798 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e a porosidade igual a 40%. Inicialmente, foram coletados dados durante cinco meses. O experimento foi realizado sem a utilização de aeração forçada da massa de grãos.

5-2.2. Condições operacionais

Foi implementado um sistema de aquisição de dados, com monitoramento em tempo real, com base na tecnologia 1-Wire™, utilizando-se dispositivos digitais endereçáveis (Awtrey, 1997; Awtrey, 2002).

A utilização deste tipo de rede para aquisição de dados torna-se interessante, uma vez que reduz custos com instrumentação, pois não é necessário utilizar sistema de aquisição de dados convencional. A rede 1-Wire™ utiliza apenas um condutor para transmissão de dados, em comum com todos os dispositivos ou instrumentos (escravos) ligados à rede, e um computador ou microprocessador (mestre) que, por meio de um programa computacional apropriado, gerencia todo o sistema, além de ser técnica e economicamente viável (Steidle Neto et al., 2005; Lopes et al., 2007; Monte et al., 2008; Rocha et al., 2008).

A temperatura e a umidade relativa do ar no ambiente e do ar intergranular no silo graneleiro foram medidas em 17 pontos simetricamente distribuídos. Essas variáveis, tanto no interior do graneleiro quanto no ambiente externo foram monitoradas por meio de sensores com invólucro de proteção.

O invólucro do circuito de proteção com o sensor de temperatura com tecnologia 1-Wire™ (DS2438) e umidade de relativa (HIH4000) foi construído em tubo de policloreto de vinila (PVC) com diâmetro de 32 mm e 100 mm de comprimento cada, interconectados por um fio blindado de dois pares, com perfurações de 5 mm de diâmetro para permitir circulação de ar em torno dos sensores, como ilustrado na Figura 5.1.

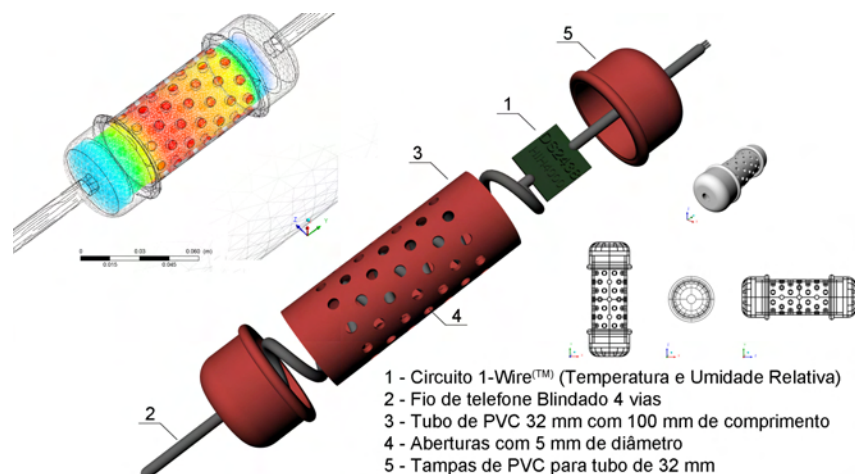


Figura 5.1 – Representação esquemática do invólucro de proteção dos sensores de temperatura e de umidade relativa.

O sistema adotado para a aquisição de dados experimentais com o uso do protocolo 1-Wire™ foi baseado no sistema STRADA (Rocha et al., 2008).

Os fios de interconexão e os invólucros foram presos a cabos de aço recobertos com capa de PVC transparente de 3,2 mm e fixado entre o fundo trapezoidal e o telhado do silo-protótipo, mantendo a mesma distância entre os sensores e as linhas de análise.

5-2.3. Aquisição de dados experimentais

Foram utilizados sensores da tecnologia 1-Wire™ para determinar a temperatura e a umidade relativa do ar intergranular. Dezesete pontos foram distribuídos, dos quais quatro pontos encontravam-se na linha central do graneleiro, oito pontos fixados nas paredes circundantes, três pontos na interface entre os grãos e o ambiente e dois pontos no ambiente externo ao graneleiro. Os sensores foram interconectados a um fio de telefone blindado de quatro vias para constituição da rede 1-Wire. Um adaptador USB DS-9490R foi utilizado para a interface sensor-computador, conectado a um computador Pentium com processador Intel Core 2 Duo de 2,93 GHz e 2 GB de memória RAM, que serviu de dispositivo mestre, para transferência de dados a partir da rede 1-Wire. A energização para a rede 1-Wire™ foi fornecida por alimentação externa de 5 V pela porta USB em que estava conectado o adaptador. Os dados de temperatura e umidade relativa foram registrados em arquivos de formato texto com uma resolução de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\%$.

5-2.4. Modelagem computacional

Devido à complexidade da geometria, o programa ANSYS ICEM CFD foi escolhido para construção de uma malha computacional hexaédrica do objeto em estudo. O elemento de volume hexaédrico mantém a sua qualidade para diferentes formas de geometria na região de interesse, exigindo uma quantidade de nós muitas vezes inferior do que os elementos da malha tetraédrica, o que pode resultar em um tamanho de arquivo e num tempo computacional menor (Lee et al., 2007; Katz & Sankaran, 2011).

5-2.5. Condições de contorno

Os resultados obtidos pela simulação utilizando CFD foram verificados e comparados com os dados correspondentes, obtidos experimentalmente, no protótipo do silo graneleiro para grãos de milho armazenado durante cinco meses sem aeração.

Os valores medidos e obtidos experimentalmente foram usados para atribuir as condições de contorno do modelo. Assim, foi necessário fornecer valores iniciais da umidade relativa e temperatura do ar no interior da massa de grãos e no ambiente externo ao graneleiro, calcular o teor de água de equilíbrio dos grãos e temperatura do ar intergranular para cada passo no tempo e resolver as equações de conservação.

Foram utilizadas variações de temperaturas com incrementos de uma hora, e também as temperaturas máximas e mínimas diárias do ar no ambiente externo, para valores em torno das paredes e na interface do grão com ar ambiente externo no graneleiro, durante a simulação para cada passo no tempo.

A técnica de CFD foi utilizada para resolver as equações de Navier-Stokes escritas para os campos médios de velocidades e de energia, quantificando os campos de temperatura e de velocidade pelo método de volumes finitos (Tu et al., 2008; Vaz et al., 2011), expressa pela Equação (5.1).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho_f E_f + (1-\varepsilon)\rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + P)) = \nabla \cdot \left[\kappa_{ef} \nabla T - \left(\sum_i h_i J_i \right) + (\bar{\tau} \cdot \vec{v}) \right] + S_f^h \quad (5.1)$$

em que

- t - Tempo, (s);
- ρ_f - Massa específica na fase fluida, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
- ρ_s - Massa específica na fase sólida, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
- ε - Porosidade do meio, decimal, adimensional;
- E_f - Energia total do fluido, ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$);
- E_s - Energia total do meio sólido, ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$);

- \vec{v} - Vetor velocidade, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);
- P - Pressão, (Pa);
- κ_{ef} - Condutividade térmica efetiva do meio, ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);
- T - Temperatura, (K);
- h_i - Entalpia, ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
- J_i - Fluxo de difusividade da espécie, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
- $\bar{\tau}$ - Tensor de tensão, ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$);
- S_f^h - Termo fonte, ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$).

O programa computacional ANSYS CFX resolve a equação padrão de transporte e de energia em meios porosos somente com modificações para o fluxo de condução e o termo transiente. No meio poroso, o fluxo de condução utiliza a condutividade efetiva e o termo transiente inclui a inércia térmica da região sólida do meio poroso (Chang & Weng, 2002; Kramer et al., 2011).

A condutividade térmica efetiva no meio poroso é calculada pela Equação (5.2):

$$\kappa_{\text{ef}} = \varepsilon \kappa_f + (1 - \varepsilon) \kappa_s \quad (5.2)$$

em que

- κ_f - Condutividade térmica da fase fluida, ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);
- κ_s - Condutividade térmica da fase sólida, ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Para fluidos newtonianos o tensor de tensão é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right] \quad (5.3)$$

em que

- μ - Viscosidade dinâmica, ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$);
- \mathbf{I} - Tensor unitário, (a dimensional).

O tensor de Reynolds foi calculado utilizando o modelo de turbulência padrão k-épsilon ($k - \varepsilon$), que avalia a viscosidade (μ_t) a partir da relação entre a energia cinética de turbulência (k) e a dissipação de energia cinética de turbulência (ε).

O fenômeno de difusão de umidade é uma questão importante, devido ao fato de que materiais com meios porosos e poliméricos estão sendo estudados mais extensamente em aplicações de engenharia. A difusão de umidade em um meio permeável a um fluido é análogo à equação de difusão de calor em regime transiente, e é descrita por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 c \quad (5.4)$$

em que

- c - Concentração de umidade, ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$);
- t - Tempo, (s);
- D - Coeficiente de difusão, (s^{-1}).

Depois de submetidos ao processo de secagem, os grãos são armazenados com um determinado teor de água adequado para preservar suas qualidades durante longo tempo, sob condições apropriadas para armazenagem. Entretanto, as condições ambientais externas ao ambiente de armazenagem interagem com aquelas no interior da massa de grãos. Deste modo, embora o processo seja lento, o teor de água dos grãos varia ao longo do tempo, tendendo a entrar em equilíbrio com as condições psicrométricas do ar intergranular. As variáveis mais importantes neste processo são a temperatura e a umidade relativa do ar intergranular, conhecida como umidade relativa de equilíbrio.

O teor de água dos grãos correspondente à umidade relativa de equilíbrio é definido como sendo teor de água de equilíbrio higroscópico, ou simplesmente equilíbrio higroscópico, e é uma função desta e da temperatura do ar intergranular.

O cálculo do teor de água de equilíbrio pode ser feito utilizando vários modelos empíricos encontrados na literatura para vários tipos de grãos e cereais. Neste trabalho foi utilizada a equação de Henderson modificada para grãos de milho (Navarro & Noyes, 2001; Corrêa et al., 2006).

$$U_e = 0,01 \left[\frac{\ln(1-U_r)}{-K(T+C)} \right]^{\frac{1}{N}} \quad (5.5)$$

em que

- U_e - Teor de água de equilíbrio do grão, decimal;
- U_r - Umidade relativa de equilíbrio do ar intergranular, decimal;
- T - Temperatura do ar intergranular, °C;
- K, N, C - Constantes da equação para cada tipo de grão.

A umidade relativa do ar é a razão entre a pressão de vapor de água na atmosfera dividida pela pressão de vapor saturado à mesma temperatura, expressa em porcentagem.

$$U_r = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) 100 \quad (5.6)$$

A pressão de vapor de água presente do ar pode ser calculada pela expressão:

$$P_v = \frac{U_r \cdot P_{vs}}{100} \quad (5.7)$$

A pressão de vapor saturado pode ser calculada utilizando a equação empírica apresentada por (Hunter, 1987), em função da temperatura do ar.

$$P_{vs} = \left[\frac{6 \cdot 10^{25}}{(T + 273,15)^5} \right] \exp\left(-\frac{6800}{T + 273,15} \right) \quad (5.8)$$

A umidade relativa e a temperatura do ar intergranular foram medidas utilizando sensores digitais endereçáveis da série 1-wire e utilizadas para calcular o teor de água de equilíbrio dos grãos utilizando a Equação (5.5).

O programa computacional ANSYS CFX[®] foi utilizado para implementar o modelo proposto, descrito pelas equações apresentadas, assumindo-se as seguintes condições:

- (a) Transporte em estado transiente;
- (b) Escoamento incompressível.

Um resíduo do tipo erro médio quadrático, com valor menor que 10^{-4} , foi adotado como critério de convergência.

As sub-rotinas em linguagem de programação FORTRAN 90 foram implementadas para personalizar as particularidades dos modelos físicos em estudo e executadas pelo programa ANSYS CFX durante o processamento e interpretadas pela Linguagem de Expressão CFX CEL (*CFX Expression Language*).

5-2.6. Validação do modelo

Os dados de temperatura medidos no interior do graneliro foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e, posteriormente, a análise de variância. As comparações entre as repetições independentes foram realizadas por meio de análise de variância para dados com distribuição normal, e pelo teste não paramétrico de Kruskal Wallis para os dados sem distribuição normal.

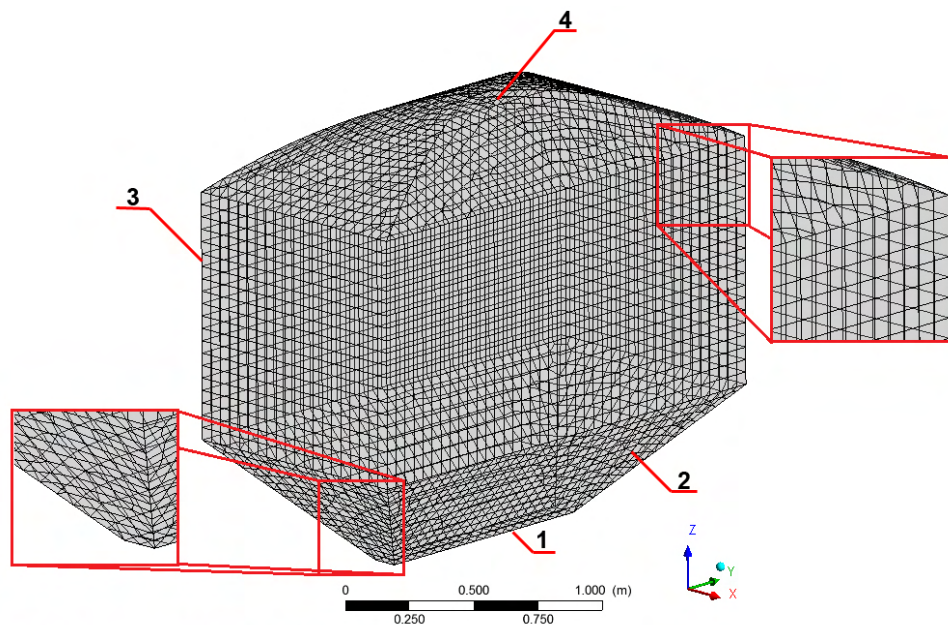
Depois das transformações apropriadas, os dados foram submetidos ao teste não-paramétrico, utilizando o programa SigmaPlot[®], versão 12.0 (Wass, 2009), para que pudesse ser realizada a análise estatística e a representação gráfica dos dados. O valor do nível de probabilidade, p , foi fixado em até 5 %, com o intuito de obter uma confiabilidade de 95 % nas comparações. Os resultados dos testes não paramétricos foram expressos com o valor da mediana.

A partir da validação inicial dos dados sem aeração, dois cenários foram simulados com percolação de ar intermitente (aeração forçada) no meio poroso com o objetivo de manter a sua temperatura abaixo de 20°C, de forma que o teor de água de equilíbrio fosse adequado. A intermitência é proporcionada pelo acionamento do sistema de aeração (entrada de ar) no graneleiro durante determinado intervalo de tempo. O primeiro cenário foi definido para um fluxo de ar com temperatura e umidade relativa controlada de 10°C e 60%, respectivamente. Para o segundo cenário, foi considerada a temperatura mínima e umidade relativa média diária no ambiente externo para o fluxo de ar de aeração.

5-3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste artigo, foi utilizado o programa computacional ICEM ANSYS™ para estabelecer as malhas no domínio em estudo, para os cálculos necessários. Foi definida uma malha hexaédrica com um total de 3548 elementos e 3585 nós. Para cada face do domínio, foram estabelecidas as condições de contorno como apresentado na Figura 5.2.

Durante o período estudado (3600 h), quando utilizado o intervalo de passos no tempo de uma hora e com valores pontuais de temperatura ambiente, observou-se que a diferença nos valores medianos entre os dados horários coletados no interior do graneleiro e os simulados durante o período de armazenamento sem aeração não era grande o suficiente para excluir a possibilidade de que a diferença fosse devida à variabilidade da amostragem aleatória, não havendo diferença estatisticamente significativa entre eles ($p = 0,547$, $n = 3600$), como apresentado na Figura 5.3 (a) e (b).

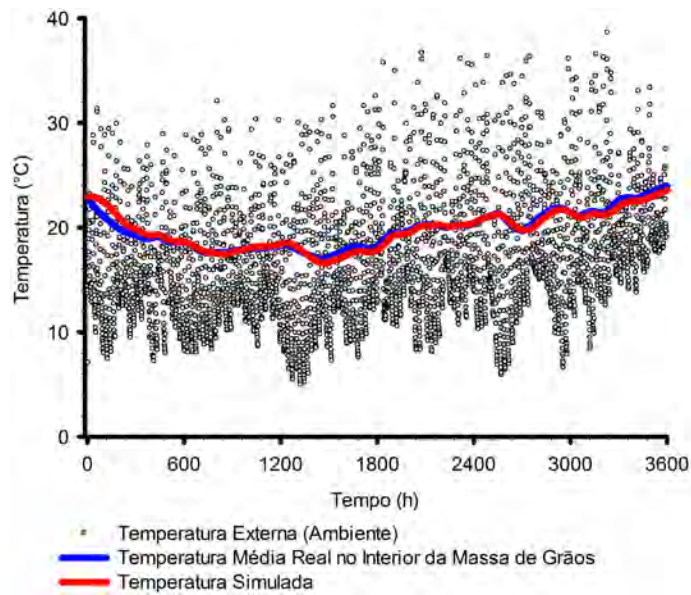


- 1 - Entrada de ar (aeração)
- 2 - Parede do Volume Trapezoidal
- 3 - Parede do Volume Retangular
- 4 - Interface da superfície da massa de grãos (contato com ar ambiente)

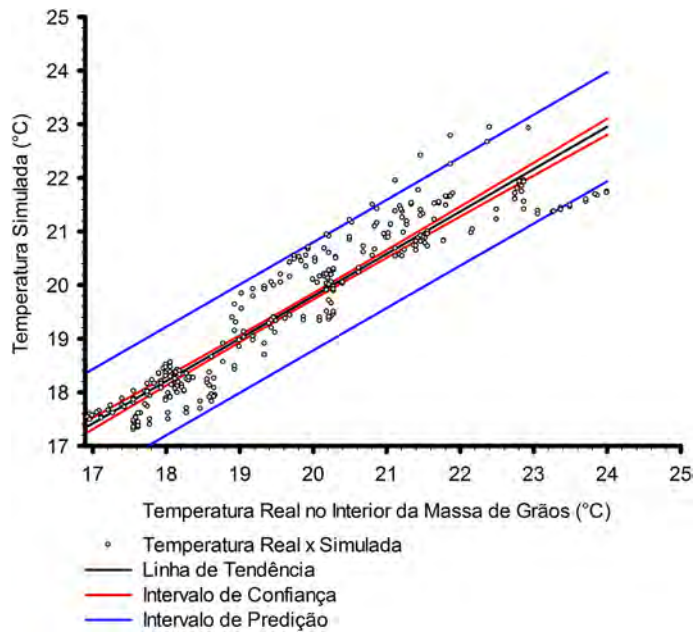
Figura 5.2 – Detalhes de refinamento da malha computacional hexaédrica.

Da mesma forma, durante o período estudado (3600 h), quando utilizado o intervalo de passos no tempo de doze horas e com valores máximos e mínimos de temperatura ambiente diária, observou-se que a diferença nos valores medianos entre os dados horários coletados no interior do graneleiro e os simulados durante o período de armazenamento sem aeração não era grande o suficiente para excluir a possibilidade de que a diferença fosse devida à variabilidade da amostragem aleatória, não havendo diferença estatisticamente significativa entre eles ($p=0,547$, $n=3600$), como apresentado na Figura 5.4 (a).

O teor de água de equilíbrio higroscópico dos grãos foi calculado utilizando a equação de Henderson modificada, para simular o teor de água dos grãos durante o armazenamento, como apresentado na Figura 5.4 (b).

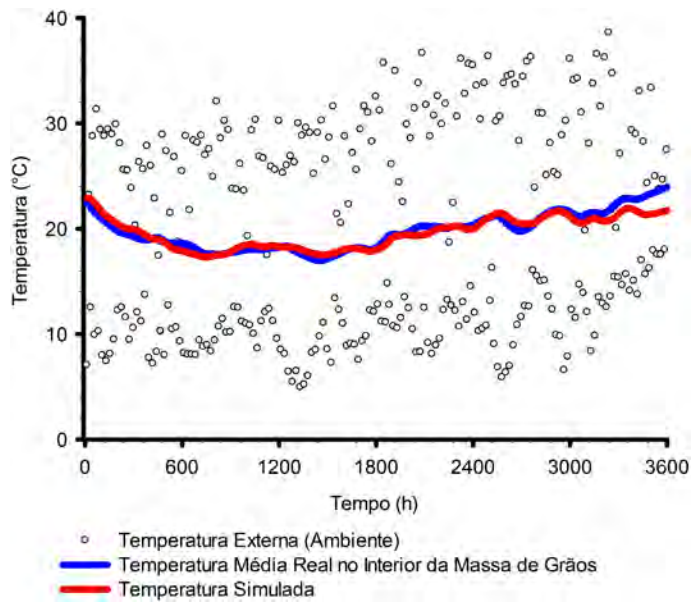


(a)

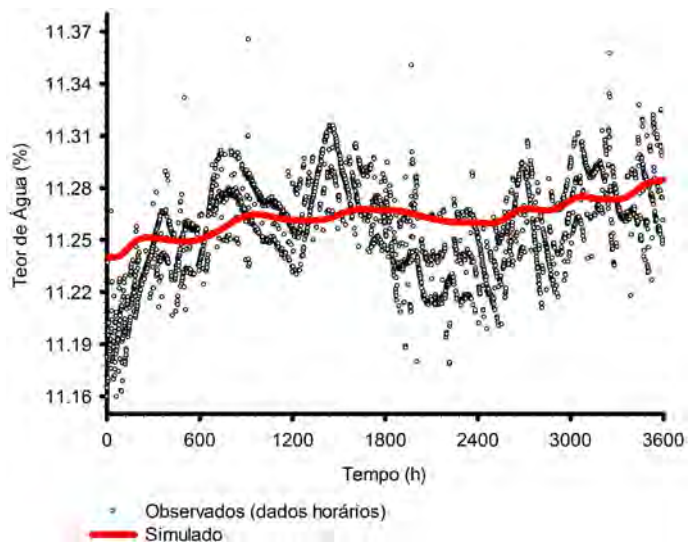


(b)

Figura 5.3- (a) Dados simulados de temperatura externa para períodos de coleta de dados de uma hora; (b) comparação entre os dados simulados e os observados, mostrando que não há diferença estatística significativa entre eles ($p = 0,547$, $n = 3600$).



(a)



(b)

Figura 5.4 - (a) Dados simulados de temperatura máxima e mínima externas para períodos de 24 horas, mostrando que não houve diferença estatisticamente significativa entre eles ($p=0,457$; $n=300$); (b) comparação entre os dados coletados e os simulados do teor de água no interior da massa de grãos.

Com base nesses resultados, dois cenários foram simulados com percolação de ar intermitente no meio poroso e a temperatura da massa de grãos foi mantida abaixo ou próxima de $(20 \pm 1^\circ\text{C})$, quando a temperatura do ar ambiente utilizado na aeração fosse superior a 20°C .

O tempo total de acionamento do sistema de aeração necessário para o primeiro cenário foi de 116 horas (Figura 5.5-a), quando foi considerado um fluxo ar na entrada do graneleiro com temperatura de 10°C e umidade relativa de 60 % .

Para o segundo cenário, o tempo total de acionamento do sistema de aeração necessário foi de 213 horas (Figura 5.5-b), quando a temperatura e a umidade relativa do ar na entrada do graneleiro eram variáveis no tempo, de acordo com os valores médios diários da temperatura mínima e da umidade relativa do ar ambiente.

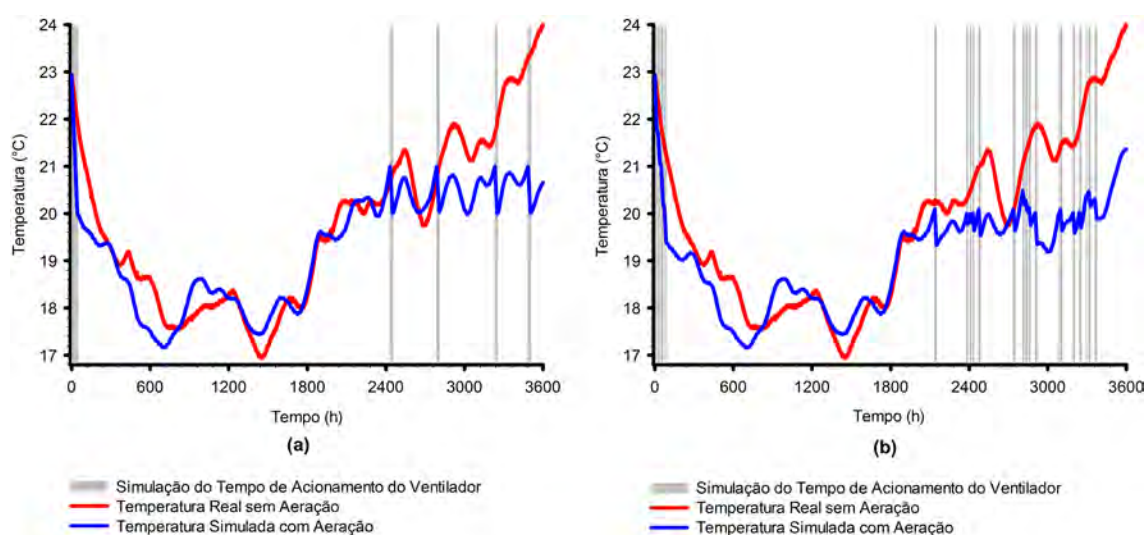


Figura 5.5 - Simulação de acionamento do sistema de aeração: (a) fluxo de ar controlado com temperatura de 10°C e umidade relativa de 60%; (b) fluxo de ar com temperatura mínima diária e umidade relativa média diária.

Os resultados da simulação mostram que o resfriamento da massa de grãos de milho armazenados, por meio de aeração utilizando fluxo de ar com temperatura controlada a 10°C e umidade relativa a 60%, pode ser utilizado para reduzir a temperatura da massa de grãos, sem afetar significativamente o teor de água do produto armazenado, conforme mostrado na Figura 5.6.

Os resultados da simulação mostram também que o resfriamento da massa de grãos de milho armazenados, utilizando dados de temperatura mínima e umidade relativa média do ar ambiente, pode ser utilizado para reduzir a temperatura da massa de grãos. Entretanto, neste caso, observa-se

um aumento significativo no teor de água dos grãos, como pode ser visto na Figura 5.6.

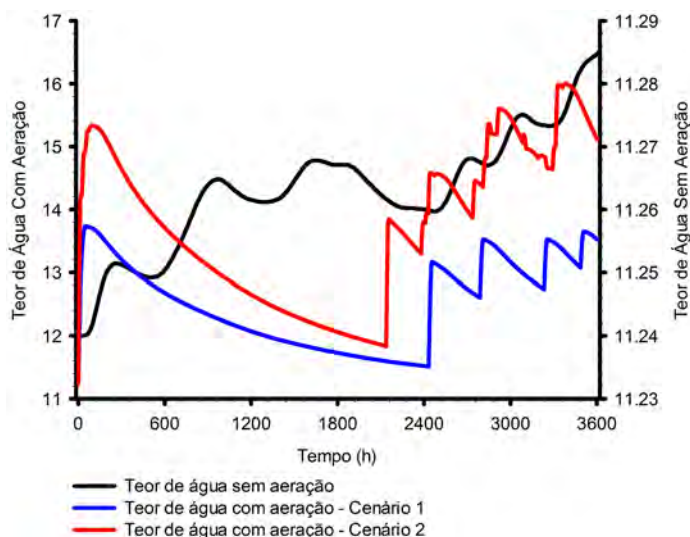


Figura 5.6 - Simulação do teor de umidade na massa de grãos.

5-4. CONCLUSÕES

A diferença nos valores medianos entre os dados horários coletados no interior do graneleiro e os simulados durante o período de armazenamento sem aeração não foi estatisticamente significativa ($p=0,547$ e $n=3600$), quando foi utilizado incremento no tempo de uma hora.

A diferença nos valores pontuais de temperatura do ar ambiente, quando foi utilizado incremento no tempo de doze horas com valores de temperaturas máximas e mínimas diárias, também não foi estatisticamente significativa ($p=0,457$ e $n=300$).

Com base nas duas conclusões anteriores, conclui-se que podem ser utilizados dados de séries climatológicas de temperaturas máximas e mínimas e umidade relativa média diária da região de interesse para predição do comportamento da massa grãos armazenada em silos graneleiros.

O tempo total de acionamento do sistema de aeração, necessário para promover a aeração adequada da massa de grãos, utilizando um fluxo de ar com temperatura de 10°C e umidade relativa de 60% , foi de 116 horas.

O tempo total de acionamento do sistema de aeração, necessário para promover a aeração adequada da massa de grãos, utilizando um fluxo de ar com temperatura e umidade relativa variável no tempo, de acordo com a temperatura mínima e a umidade relativa média diária do ar ambiente foi de 213 horas.

A simulação do resfriamento da massa de grãos foi efetiva na predição do comportamento da massa de grãos armazenada, tanto para ambas, temperatura e umidade relativa do ar de aeração controlada, quanto para temperatura mínima e umidade relativa média diária. Entretanto, é necessário observar o aumento no teor de água do grão neste último caso, que pode prejudicar a qualidade do produto durante o armazenamento.

5-5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal de Viçosa – UFV pela grande oportunidade.

5-6. REFERÊNCIAS

- Alencar, E. R. d.; Faroni, L. R. D.; Lacerda Filho, A. F.; Peternelli, L. A.; Costa, A. R. **Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 13: 606-613 (2009).
- Awtrey, D. **Transmitting Data and Power over a One Wire Bar**. Dallas Semiconductor, Sensors Magazine (1997).
- Awtrey, D. **1-Wire Addressable Digital Instruments for Environmental Monitoring**. Dallas Semiconductor, Sensors Magazine (2002).
- Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Hall, C. W. **Drying and Storage Of Grains and Oilseeds**. New York, Springer (1992).
- Brooker, D. B.; Hall, C. W.; Bakker-Arkema, F. W. **Drying Cereal Grains**, AVI Pub. Co (1974).
- Chang, W. J.; Weng, C. I. **Heat and Mass Transfer in Porous Material**. Department of Mechanical Engineering, Kun Shan University of Technology. D. B. Ingham and I. Pop. Tainan, Taiwan, Pergamon - Elsevier Science: 469 (2002).
- CONAB. **Evolução da Capacidade Estática dos Armazéns**. (2011).
- Corrêa, P. C.; A. Júnior, P. C.; Ribeiro, D. M.; Silva, F. S. d. **Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço: obtenção e modelagem**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 10: 162-167 (2006).
- Hunter, A. J. **An isostere equation for some common seeds**. Journal of Agricultural Engineering Research 37(2): 93-105 (1987).
- Katz, A.; Sankaran, V. **Mesh quality effects on the accuracy of CFD solutions on unstructured meshes**. Journal of Computational Physics 230(20): 7670-7686 (2011).

- Kramer, J.; Ravnik, J.; Jecl, R.; Škerget, L. **Simulation of 3D flow in porous media by boundary element method**. Engineering Analysis with Boundary Elements 35(12): 1256-1264 (2011).
- Lee, I. B.; Sase, S.; Sung, S. H. **Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house**. Japan Agricultural Research Quarterly 41(1): 53-64 (2007).
- Lopes, D. C.; Martins, J. H.; Monteiro, P. M. B.; Queiroz, D. M. **Redes 1-Wire aplicadas à aeração de grãos armazenados**. Acta Scientiarum. Agronomy 29(2) (2007).
- Monte, J. E. C.; Martins, J. H.; Lopes, D. C.; Monteiro, P. M. B.; Pinto, P. R. **Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina**. Acta Scientiarum 30 (3) (2008).
- Navarro, S.; Noyes, R. T. **The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management**. Florida, CRC (2001).
- Nogueira Junior, S.; Tsunehiro, A. **Produção Agrícola e Infra-Estrutura de Armazenagem no Brasil**. Informações Econômicas 35(2) (2005).
- Oliveira, J. S. e.; Martins, C. E. **Tipos de Silos**. Embrapa - Agronegócio do leite (2009).
- Rocha, K. S. O.; Martins, J. H.; Tinôco, I. F. F.; Melo, E. C.; Lopes, D. C.; Hermsdorff, W. **Remote environmental monitoring and management of data systems**. Livestock Environment VIII - Proceedings of the 8th International Symposium, Iguassu Falls (2008).
- Steidle Neto, A. J.; Baêta, F. C.; Martins, J. H.; Zolnier, S.; Monteiro, P. M. B. **Avaliação da transmissão de dados de temperatura no sistema 1-wireTM**. Engenharia Agrícola 25: 29-36 (2005).
- Tu, J.; Yeoh, G. H.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**, Butterworth-Heinemann (2008).
- Vaz, J.; Sattler, M. A.; Santos, E. D.; Isoldi, L. A. **Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger**. Energy and Buildings 43(9): 2476-2482 (2011).

Wass, J. A. ***SigmaPlot 11: Now with total sigmaStat integration.*** Scientific Computing 26(1): 21-23 (2009).

Weber, É. A. ***Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos.*** Panambi, Salles (2005).

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO DOS GRUPOS DE Π DE BUCKINGHAM

A Tabela A.1 apresenta a lista dos parâmetros dimensionais que afetam o processo transferência de calor e de massa no interior do silo graneleiro.

Tabela A.1 – Parâmetros dimensionais e conjunto de dimensões fundamentais (Primárias)

PARÂMETROS DIMENSIONAIS			
Quantidade	Parâmetros	Sistema Internacional	Dimensões (LTM θ)
Altura	H	m	L
Calor	Q	kg·m ² ·s ⁻²	ML ² T ⁻²
Calor Específico	C _p	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹	L ² T ⁻² θ ⁻¹
Coeficiente de Expansão	β_e	K ⁻¹	θ ⁻¹
Coeficiente de Transferência de Calor	\bar{h}_c	kg·s ⁻³ ·K ⁻¹	MT ⁻³ θ ⁻¹
Condutividade Térmica	k	kg·m·s ⁻³ ·K ⁻¹	MLT ⁻³ θ ⁻¹
Diâmetro Hidráulico ¹	D _h	m	L
Gravidade	g	m·s ⁻²	LT ⁻²
Massa Específica	ρ	kg·m ⁻³	ML ³
Variação de Temperatura	ΔT	K	θ
Velocidade	V	m·s ⁻¹	LT ⁻¹
Viscosidade	μ	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹	ML ⁻¹ T ⁻¹

Notas:¹ Também conhecido como “Raio Hidráulico” é um parâmetro usado para estimar o raio com seções não circulares. Consiste na razão entre a área da seção transversal (A) e o perímetro (P).

A-1. Determinação dos grupos Π

Seja n o número de parâmetros dimensionais e r o número de dimensões primárias, obtém n=12 parâmetros dimensionais e r=5 dimensões primárias. É selecionado como parâmetros repetentes ($\rho^\alpha, D_h^\beta, V^\gamma, \Delta T^\delta$) tal que m=r=4 parâmetros repetentes. Então, n=m=8 grupos Π , formando os grupos dimensionais obtêm-se:

$$\Pi_1 = \rho^\alpha \cdot D_h^\beta \cdot V^\gamma \cdot \Delta T^\delta \cdot Q$$

$$\therefore SI \equiv 1 = (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^\alpha (\text{m})^\beta (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\gamma (\text{K})^\delta (\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$$

Em termos de LTM θ obtém-se:

$$L^0 \cdot M^0 \cdot T^0 \cdot \theta^0 = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [M \cdot L^2 \cdot T^{-2}]$$

Para

$$\theta) \delta = 0$$

$$M) \alpha + 1 = 0 \therefore \alpha = -1$$

$$T) -\gamma - 2 = 0 \therefore \gamma = -2$$

$$L) -3\alpha + \beta + \gamma + 2 = 0 \therefore \beta = 3\alpha - \gamma - 2$$

$$\beta = -3$$

$$\text{Portanto: } \Pi_1 = (\rho^{-1} \cdot D_h^{-3} \cdot V^{-2} \cdot \Delta T^0 \cdot Q) \therefore \Pi_1 = Q \cdot \rho^{-1} \cdot V^{-2} \cdot D_h^{-3}$$

$$\Pi_2 = \rho^\alpha \cdot D_h^\beta \cdot V^\gamma \cdot \Delta T^\delta \cdot H \therefore SI \equiv 1 = (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^\alpha (\text{m})^\beta (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\gamma (\text{K})^\delta (\text{m})$$

Em termos de LTM θ obtém-se:

$$L^0 \cdot M^0 \cdot T^0 \cdot \theta^0 = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [L]$$

Para

$$\theta) \delta = 0$$

$$M) \alpha = 0$$

$$T) -\gamma = 0 \therefore \gamma = 0$$

$$L) -3\alpha + \beta + \gamma + 1 = 0 \therefore \beta = 3\alpha - \gamma - 1$$

$$\beta = -1$$

$$\text{Portanto: } \Pi_2 = (\rho^0 \cdot D_h^{-1} \cdot V^0 \cdot \Delta T^0 \cdot H) \therefore \Pi_2 = H \cdot D_h^{-1}$$

$$\Pi_3 = \rho^\alpha \cdot D_h^\beta \cdot V^\gamma \cdot \Delta T^\delta \cdot C_p \therefore SI \equiv 1 = (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^\alpha (\text{m})^\beta (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\gamma (\text{K})^\delta (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$$

Em termos de LTM θ obtém-se:

$$L^0 \cdot M^0 \cdot T^0 \cdot \theta^0 = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}]$$

Para

$$\theta) \delta - 1 = 0 \therefore \delta = 1$$

$$M) \alpha = 0$$

$$T) -\gamma - 2 = 0 \therefore \gamma = -2$$

$$L) -3\alpha + \beta + \gamma + 2 = 0 \therefore \beta = 3\alpha - \gamma - 2$$

$$\beta = 0$$

$$\text{Portanto: } \Pi_3 = (\rho^0 \cdot D_h^0 \cdot V^{-2} \cdot \Delta T^1 \cdot C_p) \therefore \Pi_3 = C_p \cdot \Delta T \cdot V^{-2}$$

$$\Pi_4 = \rho^\alpha \cdot D_h^\beta \cdot V^\gamma \cdot \Delta T^\delta \cdot \beta_e \therefore SI \equiv 1 = (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^\alpha (\text{m})^\beta (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\gamma (\text{K})^\delta (\text{K}^{-1})$$

Em termos de LTM θ obtém-se:

$$L^0 \cdot M^0 \cdot T^0 \cdot \theta^0 = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [\theta^{-1}]$$

Para

$$\theta) \delta - 1 = 0 \therefore \delta = 1$$

$$M) \alpha = 0$$

$$T) -\gamma = 0 \therefore \gamma = 0$$

$$L) -3\alpha + \beta + \gamma = 0 \therefore \beta = 3\alpha - \gamma$$

$$\beta = 0$$

$$\text{Portanto: } \Pi_4 = (\rho^0 \cdot D_h^0 \cdot V^0 \cdot \Delta T^1 \cdot \beta_e) \therefore \Pi_4 = \beta_e \cdot \Delta T$$

$$\Pi_5 = \rho^\alpha \cdot D_h^\beta \cdot V^\gamma \cdot \Delta T^\delta \cdot \bar{h}_c \therefore \text{SI} \equiv 1 = (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^\alpha (\text{m})^\beta (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\gamma (\text{K})^\delta (\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$$

Em termos de LTM θ obtém-se:

$$L^0 \cdot M^0 \cdot T^0 \cdot \theta^0 = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [M \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}]$$

Para

$$\theta) \delta - 1 = 0 \therefore \delta = 1$$

$$M) \alpha + 1 = 0 \therefore \alpha = -1$$

$$T) -\gamma - 3 = 0 \therefore \gamma = -3$$

$$L) -3\alpha + \beta + \gamma = 0 \therefore \beta = 3\alpha - \gamma$$

$$\beta = 0$$

$$\text{Portanto: } \Pi_5 = (\rho^{-1} \cdot D_h^0 \cdot V^{-3} \cdot \Delta T^1 \cdot \bar{h}_c) \therefore \Pi_5 = \bar{h}_c \cdot \Delta T \cdot \rho^{-1} \cdot V^{-3}$$

$$\Pi_6 = \rho^\alpha \cdot D_h^\beta \cdot V^\gamma \cdot \Delta T^\delta \cdot k \therefore \text{SI} \equiv 1 = (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^\alpha (\text{m})^\beta (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\gamma (\text{K})^\delta (\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$$

Em termos de LTM θ obtém-se:

$$L^0 \cdot M^0 \cdot T^0 \cdot \theta^0 = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [M \cdot L \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}]$$

Para

$$\theta) \delta - 1 = 0 \therefore \delta = 1$$

$$M) \alpha + 1 = 0 \therefore \alpha = -1$$

$$T) -\gamma - 3 = 0 \therefore \gamma = -3$$

$$L) -3\alpha + \beta + \gamma + 1 = 0 \therefore \beta = 3\alpha - \gamma - 1$$

$$\beta = -1$$

$$\text{Portanto: } \Pi_6 = (\rho^{-1} \cdot D_h^{-1} \cdot V^{-3} \cdot \Delta T^1 \cdot k) \therefore \Pi_6 = k \cdot \Delta T \cdot \rho^{-1} \cdot D_h^{-1} \cdot V^{-3}$$

$$\Pi_7 = \rho^\alpha \cdot D_h^\beta \cdot V^\gamma \cdot \Delta T^\delta \cdot g \therefore \text{SI} \equiv 1 = (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^\alpha (\text{m})^\beta (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\gamma (\text{K})^\delta (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

Em termos de LTM θ obtém-se:

$$L^0 \cdot M^0 \cdot T^0 \cdot \theta^0 = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [L \cdot T^{-2}]$$

Para

$$\theta) \delta = 0$$

$$M) \alpha = 0$$

$$T) -\gamma - 2 = 0 \therefore \gamma = -2$$

$$L) -3\alpha + \beta + \gamma + 1 = 0 \therefore \beta = 3\alpha - \gamma - 1$$

$$\beta = 1$$

$$\text{Portanto: } \Pi_7 = (\rho^0 \cdot D_h^1 \cdot V^{-2} \cdot \Delta T^0 \cdot g) \therefore \Pi_7 = g \cdot D_h \cdot V^{-2}$$

$$\Pi_8 = \rho^\alpha \cdot D_h^\beta \cdot V^\gamma \cdot \Delta T^\delta \cdot \mu \therefore SI \equiv 1 = (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^\alpha (\text{m})^\beta (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\gamma (\text{K})^\delta (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$$

Em termos de LTM θ obtém-se:

$$L^0 \cdot M^0 \cdot T^0 \cdot \theta^0 = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}]$$

Para

$$\theta) \delta = 0$$

$$M) \alpha + 1 = 0 \therefore \alpha = -1$$

$$T) -\gamma - 1 = 0 \therefore \gamma = -1$$

$$L) -3\alpha + \beta + \gamma - 1 = 0 \therefore \beta = 3\alpha - \gamma + 1$$

$$\beta = -1$$

$$\text{Portanto: } \Pi_8 = (\rho^{-1} \cdot D_h^{-1} \cdot V^{-1} \cdot \Delta T^0 \cdot \mu) \therefore \Pi_8 = \mu \cdot \rho^{-1} \cdot D_h^{-1} \cdot V^{-1}$$

Certifica-se, assim, que cada grupo obtido é adimensional usando as dimensões (LTF θ).

Pela Segunda Lei de Newton, $F = m \cdot a$, a massa pode ser escrita como $m = \rho \cdot \forall$ e, se o volume tem dimensões de L^3 , $m \propto \rho \cdot L^3$. A aceleração pode ser escrita como $a = dv/dt = v \cdot dv/ds$ tal que, $a \propto V^2/L$. Então $F \propto \rho \cdot V^2 \cdot L^2$ (Fox et al., 2006).

$$F = m \cdot a \therefore F = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \therefore F = M \cdot L \cdot T^{-2}$$

em que:

$$[\Pi_1] = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [M \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \therefore$$

$$[\Pi_1] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-3}]^{-1} [L]^{-3} [L \cdot T^{-1}]^{-2} [\theta]^0 [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^2 \cdot T^{-2}] \therefore$$

$$[F^{-1} \cdot L \cdot T^{-2} \cdot L^3][L^{-3}][L^{-2} \cdot T^2][F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^2 \cdot T^{-2}] = 1$$

$$[\Pi_2] = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [L] \therefore$$

$$[\Pi_2] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-3}]^0 [L]^{-1} [L \cdot T^{-1}]^0 [\theta]^0 [L] \therefore [L^{-1} \cdot L] = 1$$

$$[\Pi_3] = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}] \therefore$$

$$[\Pi_3] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-3}]^0 [L]^0 [L \cdot T^{-1}]^{-2} [\theta]^1 [L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}] \therefore$$

$$[L^{-2} \cdot T^2][\theta][L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}] = 1$$

$$[\Pi_4] = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [\theta^{-1}] \therefore$$

$$[\Pi_4] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-3}]^0 [L]^0 [L \cdot T^{-1}]^0 [\theta]^1 [\theta^{-1}] \therefore [\theta][\theta^{-1}] = 1$$

$$[\Pi_5] = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [M \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}] \therefore$$

$$[\Pi_5] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-3}]^{-1} [L]^0 [L \cdot T^{-1}]^{-3} [\theta]^1 [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}] \therefore$$

$$[F^{-1} \cdot L \cdot T^{-2} \cdot L^3][L^{-3} \cdot T^3][\theta][F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}] = 1$$

$$[\Pi_6] = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [M \cdot L \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}] \therefore$$

$$[\Pi_6] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-3}]^{-1} [L]^{-1} [L \cdot T^{-1}]^{-3} [\theta]^1 [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}] \therefore$$

$$[F^{-1} \cdot L \cdot T^{-2} \cdot L^3][L^{-1}][L^{-1} \cdot T^3][\theta][F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot T^{-3} \cdot \theta^{-1}] = 1$$

$$[\Pi_7] = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [L \cdot T^{-2}] \therefore$$

$$[\Pi_7] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-3}]^0 [L]^1 [L \cdot T^{-1}]^{-2} [\theta]^1 [L \cdot T^{-2}] \therefore$$

$$[L][L^{-2} \cdot T^2][L \cdot T^{-2}] = 1$$

$$[\Pi_8] = [M \cdot L^{-3}]^\alpha [L]^\beta [L \cdot T^{-1}]^\gamma [\theta]^\delta [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}] \therefore$$

$$[\Pi_8] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-3}]^{-1} [L]^{-1} [L \cdot T^{-1}]^{-1} [\theta]^0 [F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}] \therefore$$

$$[F^{-1} \cdot L \cdot T^{-2} \cdot L^3][L^{-1}][L^{-1} \cdot T][F \cdot L^{-1} \cdot T^2 \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}] = 1$$

Assim a relação funcional é:

$$[\Pi_1] = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8)$$

A-2. Grupos adimensionais encontrados

A-2.1. Número de Reynolds

$$\frac{1}{\Pi_8} = \rho \cdot D_h \cdot V \cdot \mu^{-1} (R_e) \quad (A.1)$$

Número de Reynolds (R_e) é a Razão entre as forças de inércia e viscosas, definido por (VLv^{-1}). Situações onde o escoamento é influenciado por efeitos viscosos (escoamento interno, escoamento de camada-limite).

A-2.2. Número Froude

$$\frac{1}{\Pi_7} = V^2 \cdot g^{-1} \cdot D_h^{-1} \text{ (Fr)} \quad (\text{A.2})$$

O número de Froude é definido como um número adimensional que mostra a importância da força gravitacional em alguns processos em engenharia, como é o caso da convecção natural e dos fluxos de superfície que são usadas para separar ou colocar em contato duas fases com fluidos diferentes. O número de Froude é usado para caracterizar a hidrodinâmica e a estabilidade do fluxo e definir os diferentes estados do fluxo.

A-2.3. Número de Eckert

$$\frac{1}{\Pi_3} = V^2 \cdot C_p^{-1} \cdot \Delta T^{-1} \quad (\text{A.3})$$

O número de Eckert é usado em cálculos de fluxo. Expressa a relação entre energia cinética de um fluxo e a entalpia. É usado para caracterizar a dissipação viscosa de energia. O termo de dissipação viscosa de energia e a grandeza do número de Eckert tornam-se um critério para decidir se os efeitos de dissipação viscosa de energia devem ser considerados na análise da transferência de calor.

A-2.4. Número de Nusselt

$$\Pi_5 \cdot \Pi_6 = \bar{h}_c \cdot D_h \cdot k^{-1} \text{ (Nu)} \quad (\text{A.4})$$

Este número é o principal grupo adimensional para os problemas de transferência de calor. Com o coeficiente parcial de transferência de calor como parâmetro físico, caracteriza-se a cinética de interface de transferência de calor. Em alguns casos, a intensidade da transferência de calor não está diretamente relacionada aos valores do número de Nusselt. Isto é causado pelas diferenças entre os comprimentos característicos. O número de Nusselt é um acoplamento com outros números adimensionais por meio de vários relacionamentos. Essas relações são particularizadas de diversas maneiras na engenharia, seja pela solução numérica ou analítica das equações de transferência de calor e de massa em estado estacionário, pela teoria da camada limite para casos de transferência de calor, pelas analogias do

processo para casos reais de transferência de calor ou por correlações de dados experimentais.

A-2.5. Número de Biot

$$\frac{\Pi_5}{\Pi_6} = h_c \cdot D_h \cdot k^{-1} (\text{Bi}) \quad (\text{A.5})$$

O número de Biot faz uma relação entre a resistência de convecção de calor do meio sólido para o meio fluido, e a resistência à condução de calor no meio poroso. O número de Biot dá uma idéia de qual fenômeno de transferência de calor está sendo mais predominante em um determinado processo. Quando utilizado em cálculos de transferência de calor em estado transiente, o número de Biot determina se as temperaturas dentro de um corpo variam significativamente no espaço, enquanto o corpo se aquece ou arrefece ao longo do tempo, a partir de um gradiente térmico aplicado à sua superfície.

A-2.6. Número de Prandtl

$$\frac{\Pi_3 \cdot \Pi_8}{\Pi_6} = \mu \cdot C_p \cdot k^{-1} (\text{Pr}) \quad (\text{A.6})$$

Número de Prandtl (Pr) é a razão entre as difusividades de momento e térmica, definido por $c_p \cdot \mu \cdot k^{-1} = \nu \cdot \alpha^{-1}$. Pode ocorrer em situações onde há trocas de calor entre o fluido e o meio externo. O número de Prandtl descreve a relação entre a difusividade dinâmica e a difusividade térmica.

A-2.7. Número Peclet

$$\frac{\Pi_3}{\Pi_6} = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot D_h \cdot k^{-1} (\text{P}_e = \text{R}_e \cdot \text{Pr}) \quad (\text{A.7})$$

Número de Peclet (P_e) é a razão entre as taxas de transferência de calor por advecção e condução, definido por $V \cdot L \cdot \alpha^{-1} = (\text{R}_e \cdot \text{Pr})$.

A-2.8. Número de Grashof

$$\frac{\Pi_4 \cdot \Pi_7}{\Pi_8^2} = g \cdot \beta_e \cdot \Delta T \cdot D_h^3 \cdot \nu^{-2} (\text{Gr}) \quad \therefore \nu = \frac{\mu}{\rho}, \Delta T = (T_s - T_\infty) \quad (\text{A.8})$$

Número de Grashof (Gr) é a medida da razão entre forças de empuxo e forças viscosas, dado por $g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3 \cdot \nu^{-2}$. Descreve a relação entre flutuabilidade e viscosidade dentro de um fluido. Costuma-se definir o número de Grashof como o quadrado do número de Reynolds.

A-2.9. Número Rayleigh

$$\frac{\Pi_3 \cdot \Pi_4 \cdot \Pi_7}{\Pi_6 \cdot \Pi_8} = g \cdot \rho \cdot c_p \cdot \beta_e \cdot \Delta T \cdot D_h^3 \cdot k^{-1} \cdot \nu^{-1} \quad (\text{Ra}) \quad \therefore \quad (\text{A.9})$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad \Delta T = (T_s - T_\infty)$$

O número de Rayleigh é associado com os fluxos de empuxo conduzidos por convecção livre ou natural. É definido como o produto do número de Grashof e o número de Prandtl. Quando o número de Rayleigh é inferior que o valor crítico para um dado fluido, a transferência de calor é primariamente na forma de condução, quando ultrapassa este valor crítico a transferência de calor é por convecção.

A-3. Cálculos dos coeficientes de transferência de calor para o protótipo do silo graneleiro

Temperatura média na superfície da massa de grãos e no ambiente:

$$T_s = 293,21 \text{ K}$$

$$T_\infty = 289,86 \text{ K}$$

Propriedades do ar para as médias de temperatura (Valores referentes à Tabela F.1 - **Anexo F**).

$$\rho = 1,1795 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\nu = 15,544 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$k = 0,0260 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\beta_e = 3,43 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$D_h = 2,8434 \text{ m (Apêndice B)}$$

$$\text{Pr} = 0,71$$

$$\text{Gr} = g \cdot \beta_e \cdot (T_s - T_\infty) \cdot D_h^3 \cdot \nu^{-2} \therefore \text{Gr} = 1,07 \cdot 10^{10}$$

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \therefore \text{Ra} = 7,63 \cdot 10^9$$

Para o cálculo do Número de Nusselt da equação (A.4), é recomendado por McAdams (1954) a utilização da equação (A.10) para $Gr > 10^9$, em que o coeficiente de transferência de calor é independente do comprimento D_h .

$$\begin{aligned} Nu &= 0,13 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3} \\ \therefore Nu &= 255,88 \end{aligned} \tag{A.10}$$

É obtido assim o coeficiente de transferência de calor para o protótipo do silo graneleiro:

$$\bar{h}_c = 2,3388 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$$

APÊNDICE B

CÁLCULO PARA O DIÂMETRO HIDRÁULICO DO SILO GRANELEIRO

O diâmetro hidráulico é geralmente utilizado quando se trata de fluidos em dutos com seções não circulares e pode ser definido como:

$$D_h = 4 \cdot \frac{\text{Área da Seção Transversal}}{\text{Perímetro em contato com o Fluido}} \quad (\text{B.1})$$

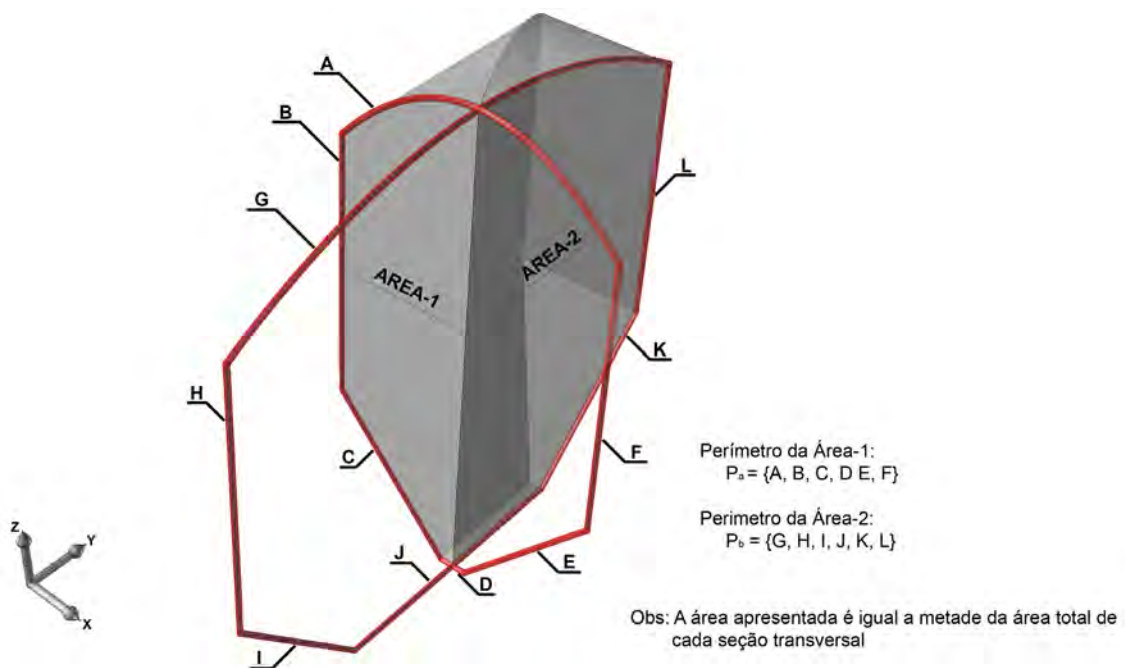


Figura B.1 – Representação esquemática dos perímetros com a área de seção transversal do protótipo do silo graneleiro.

Definiu-se o diâmetro hidráulico do silo graneleiro como:

$$D_h = \frac{8}{P_a \cdot P_b} \cdot [(P_b \cdot \text{AREA1}) + (P_a \cdot \text{AREA2})] \quad (\text{B.2})$$

APÊNDICE C

DETERMINAÇÃO DO VOLUME TRAPEZOIDAL POR CAMADAS EM SILOS COM BASES NÃO CILÍNDRICAS

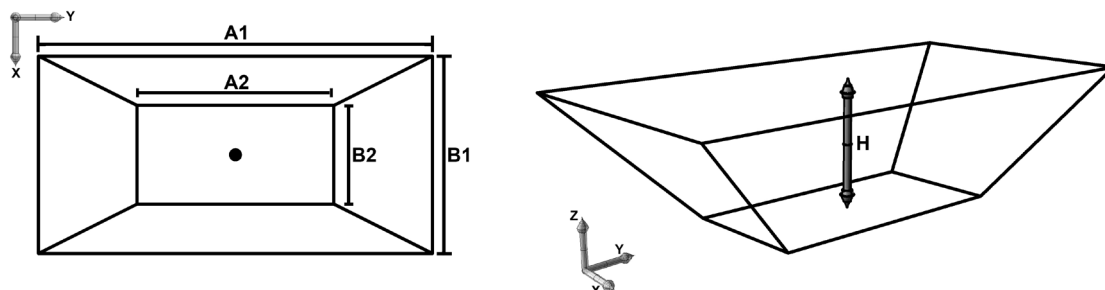


Figura C.1 – Representação das dimensões trapezoidais do silo.

A determinação do volume total do trapezóide pode ser encontrada diretamente pela equação (C.1).

$$V_{\text{total}} = \left[A1 \cdot B1 + A2 \cdot B2 + \frac{(A1 \cdot B2 + A2 \cdot B1)}{2} \right] \cdot \left(\frac{H}{3} \right) \quad (\text{C.1})$$

O volume por camadas do trapezóide de silos não circulares pode ser determinado pelo seguinte algoritmo.

INÍCIO

Ler as variáveis $A1_0$, $A2_0$, $B1_0$, $B2_0$, η_c , H ; {tal que η_c é o número de camadas}

Inicializar as variáveis:

$$\Delta H \leftarrow \frac{H}{\eta_c};$$

$$\Delta A2 \leftarrow (A1_0 - A2_0) \cdot \frac{1}{\eta_c};$$

$$\Delta B2 \leftarrow (B1_0 - B2_0) \cdot \frac{1}{\eta_c};$$

Para todo $i = 1$ até η_c faça

Início

$$A1_i \leftarrow A2_{i-1} + \Delta A2;$$

$$B1_i \leftarrow B2_{i-1} + \Delta B2;$$

$$A2_i \leftarrow A1_i;$$

$$B2_i \leftarrow B1_i;$$

$$V_{\text{camada},i} \leftarrow \left(A1_i \cdot B1_i + A2_{i-1} \cdot B2_{i-1} + \frac{(A1_i \cdot B2_{i-1} + A2_{i-1} \cdot B1_i)}{2} \right) \cdot \left(\frac{\Delta H}{3} \right);$$

Fim

FIM

APÊNDICE D

CIRCUITO PARA MONITORAMENTO DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA UTILIZANDO-SE A TECNOLOGIA 1-WIRE

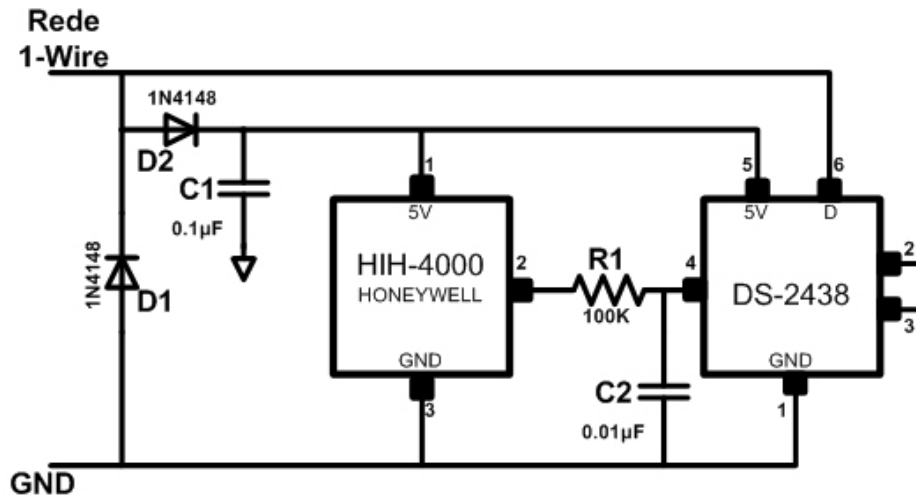


Figura D.1 – Esquema do circuito de temperatura e umidade relativa com tecnologia 1-Wire (Awtrey, 2001).

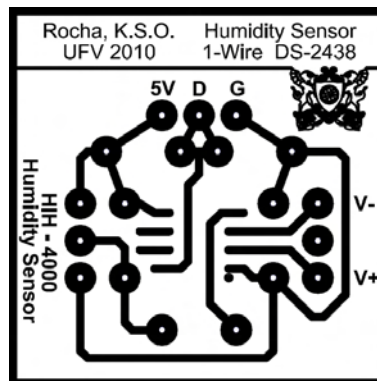


Figura D.2 – Esquema para impressão e montagem do circuito integrado.

ANEXO A.

NORMATIZAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE VENTILADORES

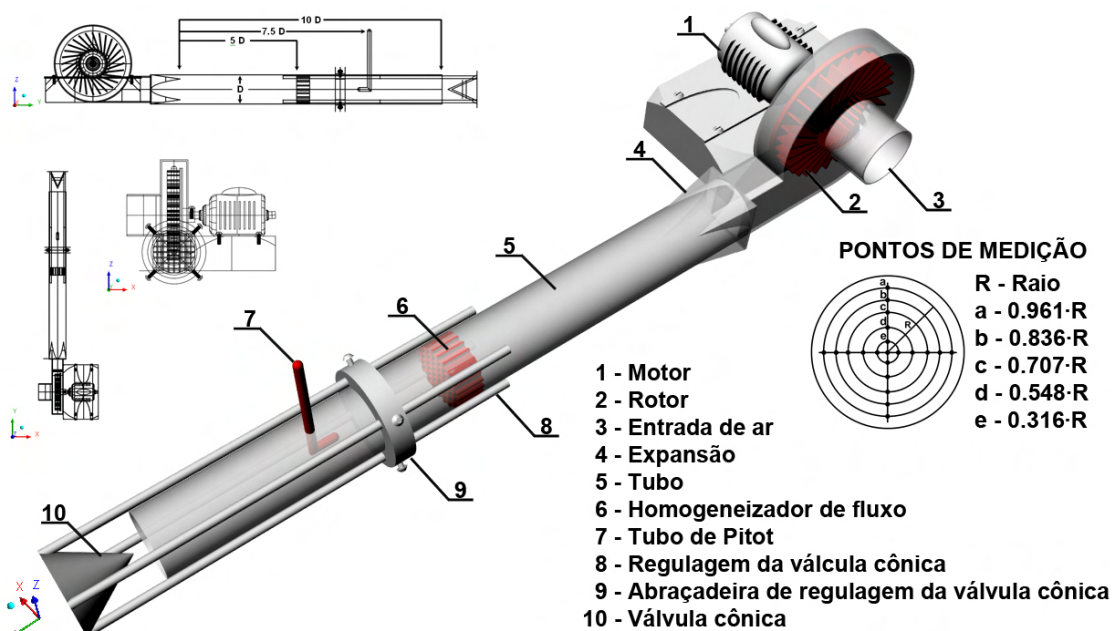


Figura A.1 – Representação esquemática da padronização pela Air Moving and Conditioning Association (AMCA) para testes laboratoriais em ventiladores.

A-1. Curva Característica do ventilador utilizado no protótipo do silo graneleiro.

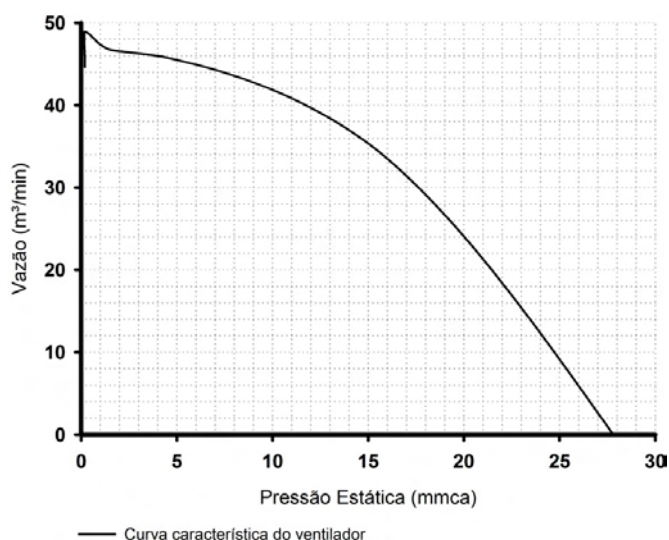


Figura A.2 – Curva característica do ventilador centrífugo utilizado no protótipo do silo graneleiro.

ANEXO B.

COMANDO DE EXECUÇÃO DO COMPILADOR FORTRAN PARA DIVERSAS PLATAFORMAS

Os comandos dados na Tabela B.1 são os padrões usados para executar o compilador em cada plataforma associada.

Tabela B.1 – Comandos para execução do compilador FORTRAN em cada plataforma associada

COMPILADOR FORTRAN	
Plataforma	Comando
winnt	ifort
winnt-amd64	ifort
hpux, hpux-ia64	f90
linux	pgf95, gfortran, g77
linux-amd64	pgf95, gfortran, g77
linux-ia64	ifort
solaris	f90
aix	xlF

Fonte: (ANSYS Inc, 2007).

ANEXO C.

FUNÇÕES EM LINGUAGEM DE EXPRESSÃO CFX

As funções matemáticas listadas na Tabela C.1 podem ser incorporadas em qualquer sub-rotina CEL no pré-processamento, processamento (solver) ou pós-processamento CFX.

Tabela C.1 – Funções matemáticas padrão na Linguagem de Expressão CFX

FUNÇÕES EM LINGUAGEM DE EXPRESSÃO CFX		
Função	Valor de Operação	Resultado
sin([radianos])	Quaisquer	Adimensional
cos([radianos])	Quaisquer	Adimensional
tan([radianos])	Quaisquer **	Adimensional
asin([])	$-1 \leq x \leq 1$	Radianos
acos([])	$-1 \leq x \leq 1$	Radianos
atan([])	Quaisquer	Radianos
atan2([a], [a])	Quaisquer	Radianos
sinh	Quaisquer	Adimensional
cosh	Quaisquer	Adimensional
tanh	Quaisquer	Adimensional
exp([])	Quaisquer	Adimensional
loge([])	$0 < x$	Adimensional
log10([])	$0 < x$	Adimensional
abs([a])	Quaisquer	[x]
sqrt([a])	$0 \leq x$	$[x]^{0.5}$
step([]) *	Quaisquer *	Adimensional
min([a], [a])	Quaisquer	[x]
max([a], [a])	Quaisquer	[x]
int	Quaisquer	Entrada
nint	Quaisquer	Entrada

* step(x) 0 para valores de x negativos, 1 para valores positivos e 0,5 para x=0

** tan(x) é indefinida para $n \cdot \pi \cdot 2^{-1}$ em que $n = 1, 3, 5, \dots$

Fonte: (ANSYS Inc, 2007)

ANEXO D.

FUNÇÕES ADICIONAIS EM LINGUAGEM DE EXPRESSÃO CFX PARA O PRÉ-PROCESSAMENTO E PROCESSAMENTO

As funções adicionais listadas na Tabela D.1 podem ser incorporadas em qualquer sub-rotina CEL no pré-processamento e processamento (solver).

Tabela D.1 – Funções adicionais na Linguagem de Expressão CFX para o pré-processamento e processamento

FUNÇÕES ADICIONAIS NA LINGUAGEM DE EXPRESSÃO CFX			
Função	Descrição	Quantidade	Região Válida
area()	Área de uma fronteira ou interface.	Área	Todas as fronteiras ou interfaces
area_x() area_y() area_z()	O componente do vetor normal na direção x, y ou z.	Área	Todas as fronteiras ou interfaces
areaAve(<var>)	Área média ponderada da variável em uma fronteira	Unidade da variável	Todas as fronteiras ou interfaces
areaInt(<var>)	Área integral da variável em uma fronteira.	Unidade da variável multiplicada pela área	Todas as fronteiras ou interfaces
ave(<var>)	Média aritmética das variáveis dentro de um domínio ou subdomínio	Unidade da variável	Domínios ou subdomínios
force()	A magnitude do vetor força em uma fronteira.	Força	Paredes
force_x() force_y() force_z()	O componente do vetor de força na direção x, y ou z.	Força	Paredes
mass()	A massa total dentro de um domínio ou subdomínio. Depende do fluido.	Massa	Domínio ou subdomínio
massAve(<var>)	Massa média da variável em um domínio ou subdomínio.	Unidade da variável	Domínio ou subdomínio
massInt(<var>)	A massa integral da variável dentro de um domínio ou subdomínio	Unidade da variável multiplicada pela massa	Domínio ou subdomínio
massFlowAve(<var>)	Média do fluxo de massa da variável em uma fronteira	Unidade da variável	Entradas, saídas, aberturas e interfaces de fluido-fluido
massFlowInt(<var>)	Fluxo integral de massa da variável em uma fronteira	Unidade da variável multiplicada pelo fluxo mássico	Entradas, saídas, aberturas e interfaces de fluido-fluido
massFlow()	Fluxo de massa através de uma fronteira	Fluxo de massa	Entradas, saídas, aberturas e interfaces de fluido-fluido
maxVal(<var>)	Valor máximo da variável dentro de um domínio ou subdomínio	Unidade da Variável	Domínio ou subdomínio
minVal(<var>)	Valor mínimo da variável dentro de um domínio ou subdomínio	Unidade da Variável	Domínio ou subdomínio
rmsAve(<var>)	RMS média da variável dentro de um domínio.	Unidade da Variável	Domínio ou subdomínio
sum(<var>)	Soma das variáveis de todos os vértices do domínio ou subdomínio	Unidade da Variável	Domínio ou subdomínio
volume()	O volume total de um domínio ou subdomínio	Volume	Domínio ou subdomínio
volumeAve(<var>)	Volume médio da variável em um domínio	Unidade da Variável	Domínio ou subdomínio
volumeInt(<var>)	Volume integral da variável dentro de um domínio ou subdomínio	Unidade da Variável multiplicada pelo volume	Domínio ou subdomínio

Fonte: (ANSYS Inc, 2007)

ANEXO E.

CONSTANTES PARA AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS GRÃOS

O coeficiente de transferência de calor por convecção h para grãos pode ser obtido por meio de equação (E.1) e pelas constantes apresentadas na Tabela E.1. Da mesma forma, a condutividade térmica está apresentada na Tabela E.2 e o calor específico na Tabela E.3, respectivamente, para vários tipos de grãos (Brooker *et al.*, 1974; Brooker *et al.*, 1992):

$$h = A_h \cdot C_a \cdot G_a \left(\frac{2 \cdot r_o \cdot G_a}{\mu_a} \right)^{B_h} \quad (\text{E.1})$$
$$\therefore \mu_a = C + D \cdot T$$

Tabela E.1 – Constantes para calcular o coeficiente de transferência calor por convecção dos grãos

Constantes (S.I.)			
A_h	B_h	C	D
0,2755	-0,34	0,06175	0,000165

Em que

- r_o - Raio Equivalente da partícula, (m);
- C_a - Calor específico do ar, ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);
- G_a - Taxa do fluxo de ar, ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$);
- μ_a - Viscosidade do ar, ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$);
- T - Temperatura do ar, ($^\circ\text{C}$)

Tabela E.2 – Constantes para calcular a condutividade térmica de vários grãos

$$k = A_k + B_k \cdot M \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$$

Grão	Teor de água (% b.u.)	Constantes (S.I.)	
		A_k	B_k
Milho Amarelo	5 – 30	0,1409	0,00112
Aveia	9 – 28	0,0499	0,00155
Arroz Médio	10 – 20	0,0863	0,00134
Arroz Pequeno	11 – 24	0,1000	0,00110
Sorgo	1 – 23	0,0976	0,00148
Trigo duro	2 – 14	0,1161	0,00039
Trigo Macio	1 – 20	0,1170	0,00113

Tabela E.3 – Constantes para calcular o calor específico de vários grãos

$$c_p = A_c + B_c \cdot M \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$$

Grão	Temperatura Média (°C)	Constantes (S.I.)	
		A_c	B_c
Milho Amarelo	20,5	1,465	0,0356
Aveia	–	1,277	0,0327
Arroz Médio	–	1,110	0,0448
Arroz Pequeno	–	1,110	0,0448
Sorgo	23,9	1,390	0,0322
Trigo duro	–	1,185	0,0303
Trigo Macio	–	1,394	0,0409

ANEXO F.

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE GASES À PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Tabela F.1 – Propriedades termofísicas de gases à pressão atmosférica

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO AR							
T (K)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	c_p ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$\mu\cdot 10^7$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)	$\nu\cdot 10^6$ ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	$k\cdot 10^3$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$\alpha\cdot 10^6$ ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	Pr
200	1,7458	1,007	132,5	7,590	18,1	10,3	0,737
250	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700

Fonte: (Incropera et al., 2008)

REFERÊNCIAS

- ANSYS Inc. **ANSYS CFX 11.0 - Technical Specifications**. Contract Holder (2007).
- Awtrey, D. **1-Wire Addressable Digital Instruments for Environmental Monitoring**. Sensors Mag - Motorola Semiconductor (2001).
- Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Hall, C. W. **Drying and Storage Of Grains and Oilseeds**. New York, Springer (1992).
- Brooker, D. B.; Hall, C. W.; Bakker-Arkema, F. W. **Drying Cereal Grains**, AVI Pub. Co (1974).
- Fox, R. W.; Mcdonald, A. t.; Pritchard, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro, LTC (2006).
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro, LTC (2008).
- McAdams, W. H. **Heat Transmission**. Toronto, New Yourk (1954).