



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Leonardo Alves da Costa

**SECAGEM DO MILHO EM CAMADA ESPESSA: análise experimental e simulação  
numérica tridimensional em secador cilíndrico de leito fixo com admissão radial do ar  
de secagem**

Belo Horizonte

2024

Leonardo Alves da Costa

**SECAGEM DO MILHO EM CAMADA ESPESSA: análise experimental e simulação numérica tridimensional em secador cilíndrico de leito fixo com admissão radial do ar de secagem**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Rudolf Huebner

Coorientador: Prof. Dr. José Leôncio Fonseca de Souza

Belo Horizonte  
2024

C837s

da Costa, Leonardo Alves.

Secagem do milho em camada espessa [recurso eletrônico] : análise experimental e simulação numérica tridimensional em secador cilíndrico de leito fixo com admissão radial do ar de secagem / Leonardo Alves da Costa. – 2024.

1 recurso online (197 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Rudolf Huebner.

Coorientador: José Leôncio Fonseca de Souza.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices e anexos: f. 175-197.

Bibliografia: f. 166-174.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Sustentabilidade – Teses. 3. Umidade – Teses. 4. Modelos matemáticos – Teses. 5. Milho – Secagem – Teses. I. Huebner, Rudolf. II. Souza, José Leôncio Fonseca de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

## FOLHA DE APROVAÇÃO

# **"SECAGEM DO MILHO EM CAMADA ESPESSA: ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL EM SECADOR CILÍNDRICO DE LEITO FIXO COM ADMISSÃO RADIAL DO AR DE SECAGEM"**

**LEONARDO ALVES DA COSTA**

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Rudolf Huebner (Orientador - Departamento de Engenharia mecânica/UFMG), Dr. José Leôncio Fonseca de Souza (Coorientador - Departamento de Engenharia Mecânica/CEFET-MG), Dr. Marco Aurélio Guerra Pimentel (Pesquisador/Embrapa Milho e Sorgo), Dr. André Guimarães Ferreira (Departamento de Engenharia de Materiais/CEFET-MG), Dr. André Augusto Campagnole dos Santos (Pesquisador/CDTN-CNEN) e Dra. Andréa Oliveira Souza da Costa (Departamento de Engenharia Química/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Tese aprovada no dia 20 de fevereiro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Rudolf Huebner, Professor do Magistério Superior**, em 22/02/2024, às 18:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Aurélio Guerra Pimentel, Usuário Externo**, em 27/02/2024, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Leôncio Fonseca de Souza, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Guimarães Ferreira, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 17:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andre Augusto Campagnole dos Santos, Usuário Externo**, em 04/03/2024, às 21:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Oliveira Souza da Costa, Professora do Magistério Superior**, em 06/03/2024, às 15:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3039861** e o código CRC **FEDA2BE3**.

---

Referência: Processo nº 23072.209174/2024-73

SEI nº 3039861

Dedico este longo trabalho de tese à minha família, pois és o meu sustento e minha motivação para vencer os desafios. Também dedico àqueles que acreditaram erroneamente que este trabalho não seria concluído.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por permitir a continuidade da minha vida e me proteger nos momentos difíceis.

Aos meus filhos e minha esposa Fabiana por sempre estarem comigo em todos os momentos, despertando alegria e motivação para finalizar este trabalho.

À minha mãe Dilma Lacerda por confiar no seu filho desde o início da minha vida, sempre acreditando no meu sucesso.

Ao amigo José Leôncio por iniciar as discussões sobre este trabalho e acreditar que seria possível desenvolvê-lo.

Ao meu orientador Rudolf por permitir o desenvolvimento deste trabalho em conjunto e sempre motivar-me.

Ao amigo André Dias por trabalhar comigo no projeto compartilhando ideias e possibilitando a construção do secador.

Ao CEFET-MG e ao professor André Guimarães, por permitir o uso do laboratório físico e equipamentos necessários.

À EMBRAPA e ao pesquisador Marco Aurélio por fornecer os grãos para secagem.

À UFMG pela oportunidade concluir a minha formação, desde a graduação até o Doutorado.

*“A persistência é o caminho do êxito.”*  
(Charles Chaplin)

## RESUMO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho e o segundo em exportações, além de apresentar um volume crescente de colheitas do cereal devido a ampliação do comércio com os asiáticos. Desta forma é crescente a necessidade de secagem dos grãos, objetivando o armazenamento adequado e longo. Assim, toda melhoria e aceleração do processo de secagem de grãos de milho fornece um benefício significativo para pequenos e grandes produtores. Neste trabalho foi obtido um modelo tridimensional validado para a secagem de grãos de milho cultivar BG 7640 VYH em secador cilíndrico com admissão radial do ar, sendo utilizadas equações para a camada delgada e propriedades físicas ajustadas para o próprio cultivar, sendo que modelos com estas características não foram encontrados na literatura. A análise foi realizada em diferentes temperaturas e velocidades do ar. Para tanto, modelos matemáticos de secagem de grãos em camada delgada foram testados e ajustados para as condições de secagem do milho. Um secador em escala laboratorial foi utilizado para aquisição de dados experimentais da secagem do milho em camada espessa. Foram realizados testes experimentais visando a determinação da umidade de equilíbrio nos grãos em determinadas temperaturas do ar. Termopares posicionados no interior do leito foram utilizados para monitorar a temperatura dos grãos. A pressão estática e a velocidade de escoamento do ar na entrada foram monitoradas. Foram testados modelos de camada delgada disponíveis na literatura e melhores resultados foram obtidos com o modelo de Page. A secagem em camada espessa foi realizada em uma coluna de secagem cilíndrica com admissão radial do ar, para a velocidade de 2 e 4 m.s<sup>-1</sup> nas temperaturas de 40, 50 e 60°C, os testes forneceram dados experimentais para validação do modelo matemático. A simulação foi executada no *software* COMSOL *Multiphysics*, que utiliza o método dos elementos finitos para solução de equações diferenciais. Os resultados numéricos para a variação temporal do teor médio de umidade do leito, teor de umidade local do milho e da temperatura do ar foram confrontados com os dados experimentais. Todos os dados para o teor de umidade corroboraram fornecendo valores superiores a 0,97 para R<sup>2</sup> e inferiores a 5% para o erro relativo (P). Para a temperatura do ar foram obtidos valores de P entre 4 e 15%. Após a validação foram executadas simulações para um secador de médio porte, este mostrou eficiências energética e exergetica de 45 e 5%, respectivamente.

Palavras-chave: leito fixo de grãos; secagem do milho; experimento; método dos elementos finitos.

## ABSTRACT

Brazil is the third largest corn producer in the world and the second in exports, in addition to presenting a growing volume of cereal harvests due to the introduction of trade with Asian countries. In this way, the need for drying the grains is increasing, aiming at adequate and long-term processing. Thus, all the improvement and monitoring of the corn grain drying process provide a significant benefit for small and large producers. In this work, a validated three-dimensional model was obtained for drying corn grains of the BG 7640 VYH variety in a cylindrical dryer with radial air admission, using equations for the thin layer and physical properties adjusted for the cultivar itself, and models with these characteristics were not found in the literature. For this purpose, mathematical models of thin layer grain drying were tested and adjusted for corn drying conditions. A laboratory-scale drying column was developed to analyze thick layer drying, based on a large cylindrical radial dryer. Experimental tests were carried out aiming at the engineering of the equilibrium temperature in the grains at certain air temperatures. Thermocouples positioned inside the bed were used to monitor grain temperature. Static pressure and air flow velocity at the inlet were monitored. To experimentally test how the thin layer models were used, a drying column of smaller dimensions was used. Six different thin-layer models were tested, and after adjustment the Page, Midilli and Overhults models stood out, with coefficients of determination ( $R^2$ ) equal to one and relative errors lower (P) than 1%. Thick layer drying was carried out in the radial cylindrical drying column constructed, for the speed of 2 and 4 m.s<sup>-1</sup> at temperatures of 40, 50 and 60°C, the tests provided experimental data for validation of the mathematical model. The simulation was performed using the COMSOL Multiphysics *software*, which uses the finite element method to solve differential equations. The numerical results for the temporal variation of the average moisture content of the bed, local moisture content of the corn and air temperature were compared with the experimental data. All data for moisture content corroborated providing values greater than 0.97 for  $R^2$  and less than 5% for P. For air temperature, P values between 4 and 15% were obtained. After validation, simulations were performed for a medium-sized dryer, which showed energy and exergy efficiencies of 45 and 5%, respectively.

Keywords: grains fixed bed; corn drying; experiment; finite element method.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Milho dentado com indentação típica no topo do grão e endosperma farináceo (a) e milho duro ( <i>flint</i> ) com topo do grão arredondado e alta proporção de endosperma vítreo (b). .....	30
FIGURA 2.2 - Esquema das partes de um grão de milho. ....	30
FIGURA 2.3 - Avanço da macha escura em grãos de milho em maturidade fisiológica. Queda do teor de umidade da esquerda para a direita.....	32
FIGURA 2.4 - Classificação de secadores quanto ao sistema de carga. (a) Secador de leito fixo de grãos. (b) Secador não estacionário, se no ponto A ocorrer recirculação têm-se secador intermitente, caso contrário secador contínuo. ....	37
FIGURA 2.5 - Classificação de secadores quanto ao fluxo do ar de secagem. (1) Fluxo em leito fixo. (2) Concorrente. (3) Contracorrente. (4) Fluxo cruzado .....	38
FIGURA 2.6 - Classificação de secadores quanto a geometria interna. (a) Secador em cascata. (b) Secador de coluna com difusor de ar central. ....	39
FIGURA 2.7 - Outros tipos de secadores. (a) Secador rotativo. (b) Secador por convecção natural. (c) Secador de leito fluidizado.....	40
FIGURA 2.8 - Esquema de secador cilíndrico de leito fixo com admissão radial de ar. ....	41
FIGURA 2.9 - Movimento da água na superfície do grão durante o processo de secagem devido a um gradiente de pressão parcial.....	43
FIGURA 2.10 - As três etapas da secagem em camadas. Zona de material com umidade inicial (A), zona de secagem (B) e zona de material seco (C).....	43
FIGURA 2.11 - - Curvas típicas para a cinética da secagem de produtos agrícolas. (a) Conteúdo de umidade em função do tempo. (b) Taxa de secagem em função do tempo.....	45
FIGURA 2.12 – Decomposição da camada espessa em camadas delgadas .....	55
FIGURA 2.13 - Esquema para as variáveis de secagem em um volume de controle. ....	59
FIGURA 3.1 - Milho utilizado nos procedimentos experimentais. (a) Milho in natura, (b) máquina para colheita e debulha e (c) aspecto do produto colhido.....	67
FIGURA 3.2 - Balanças digitais adquiridas para realização dos procedimentos experimentais. (a) menor capacidade e (b) maior capacidade. ....	68
FIGURA 3.3 - Estufa do laboratório de secagem do CEFET-MG utilizada nos testes do teor de umidade. ....	68

FIGURA 3.4 - Termo-anemômetro de fio quente do laboratório de energia do CEFET-MG utilizado nas medidas de velocidade do ar de secagem.....	69
FIGURA 3.5 - Termo-higrômetro digital adquirido para medições de umidade relativa do ar. ....	69
FIGURA 3.6 – Termopar tipo J com haste de 100 mm.....	70
FIGURA 3.7 – Transdutor de pressão do laboratório de energia do CEFET-MG utilizado para medidas de pressão na entrada.....	70
FIGURA 3.8 – Sistema multifuncional de aquisição de dados do laboratório de energia do CEFET-MG. (a) mainframe AGILENT, (b) módulo 34921T, (c) bloco para fixação de canais e (d) esquema simplificado do sistema.....	71
FIGURA 3.9 – Esquema das partes do sistema de secagem com coluna intercambiável disponível no CEFET-MG. ....	72
FIGURA 3.10 – Detalhes do sistema de secagem. (a) Ventilador siroco, (b) câmara de aquecimento, (c) plenum e base para coluna, (d) pontos de medição e (e) controlador de aquecimento.....	73
FIGURA 3.11 – Coluna para secagem em camada delgada fabricada. (a) Visão da parte externa e (b) da parte interna.....	75
FIGURA 3.12 – Dimensões da coluna de secagem para a camada espessa construída.....	76
FIGURA 3.13 – Detalhes da coluna de secagem em camada espessa construída. (a) Visão com o produto a ser seco e (b) vazia sem a badeja de contenção.....	77
FIGURA 3.14 – Materiais auxiliares para a secagem de milho em camada espessa. (a) Leito com o milho e materiais auxiliares, (b) retirada e adição dos copos e (c) detalhe do empilhamento de três copos. ....	78
FIGURA 3.15 – Visão do interior da coluna de secagem em camada espessa com as posições angulares e radiais para amostragem do teor de umidade do milho.....	79
FIGURA 3.16 – Esquema de equipamentos para o procedimento experimental em camada delgada.....	81
FIGURA 3.17 – Esquema de equipamentos para o procedimento experimental em camada espessa .....	84
FIGURA 3.18 – Modelos geométricos para grãos de milho. (a) Esferoide escaleno triaxial e (b) paralelepípedo retângulo.....	88
FIGURA 3.19 – Esquema para o volume de controle em coordenadas cilíndricas. ....	91
FIGURA 3.20 – Esquema para a localização das coordenadas no secador (a) e condições de contorno (b). ....	94

FIGURA 3.21 – Domínios para a geometria computacional, (a) visão geral, (b) duto central (domínio-1) e (c) câmara de secagem de grãos (domínio-2).....	104
FIGURA 4.1 – Curvas de linearidade para as propriedades físicas médias do milho determinadas experimentalmente. (a) Porosidade, (b) massa específica e (c) calor específico .....	112
FIGURA 4.2 – Curva de ajuste dos dados experimentais para o teor de umidade de equilíbrio dos grãos de milho.....	115
FIGURA 4.3 – Razão de umidade para a secagem do milho em camada delgada em diferentes velocidades de escoamento e temperaturas do ar de secagem.....	118
FIGURA 4.4 - Valores da razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page, obtidos para a secagem do milho em diferentes velocidade e temperatura de secagem. ....	123
FIGURA 4.5 – Curva de regressão linear para o parâmetro k do modelo de Page.....	125
FIGURA 4.6 – Razão de umidade para a secagem do milho em camada espessa em diferentes condições de temperatura e velocidade do ar. ....	127
FIGURA 4.7 – Dados para a razão de umidade em todos os copos obtidos nas condições de secagem dos testes 10 e 13. ....	129
FIGURA 4.8 – Dados para a razão de umidade em todos os copos obtidos nas condições de secagem dos testes 11 e 14. ....	130
FIGURA 4.9 – Dados para a razão de umidade em todos os copos obtidos nas condições de secagem dos testes 12 e 15. ....	131
FIGURA 4.10 – Dados para a temperatura média do ar no leito de grãos obtidos em todos os testes. ....	133
FIGURA 4.11– Temperaturas dos termopares 01 a 10 para os testes 10 e 13 em diferentes velocidades e mesma temperatura para o ar de secagem.....	135
FIGURA 4.12– Temperaturas dos termopares 01 a 10 para os testes 11 e14 em diferentes velocidades e mesma temperatura para o ar de secagem.....	136
FIGURA 4.13– Temperaturas dos termopares 01 a 10 para os testes 12 e15 em diferentes velocidades e mesma temperatura para o ar de secagem.....	137
FIGURA 5.1 – Posições específicas para a realização dos testes de malha no domínio 1 (a) e no domínio 2 (b). ....	138
FIGURA 5.2 – Diagramas para seleção da malha na geometria do domínio 1 em três posições distintas. (a) Variação da pressão e (b) variação da velocidade em função do número de elementos. ....	139

FIGURA 5.3 – Diagramas para validação da malha da geometria do domínio 1 em três posições distintas. (a) Variação da pressão e (b) variação da velocidade em função do número de elementos.....	140
FIGURA 5.4 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para o teor médio de umidade dos grãos na câmara de secagem obtidos nos testes 10 a 15. ....	143
FIGURA 5.5 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para o teor de umidade dos grãos nos copos, obtidos nos testes 10, 11 e 12. ....	145
FIGURA 5.6 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para o teor de umidade dos grãos nos copos, obtidos nos testes 13, 14 e 15. ....	146
FIGURA 5.7 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para a temperatura média do ar na câmara de secagem. (a) Testes 10, 11 e 12 e (b) testes 13, 14 e 15.....	147
FIGURA 5.8 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para a temperatura do ar obtidos nos testes 10 a 15. ....	148
FIGURA 5.9 – Perfil do teor de umidade dos grãos obtidos na simulação computacional após (a) 10 minutos, (b) 75 minutos e (c) 150 minutos de secagem.....	150
FIGURA 5.10 – Diagramas para o perfil do teor de umidade no interior do leito de grãos. (a) Diagrama para variação do teor de umidade com a posição radial. (b) Posição radial analisada. (c) Diagrama para variação do teor de umidade com a altura. (d) Posição axial analisada. ..	151
FIGURA 5.11 – Diagramas dos resultados numéricos para o efeito da temperatura do ar na entrada nas eficiências energética e exergética da secagem no secador projetado neste trabalho. ....	153
FIGURA 5.12 – Diagramas dos resultados numéricos para o efeito da velocidade do ar na entrada nas eficiências energética e exergética da secagem no secador projetado neste trabalho. ....	154
FIGURA 5.13 – Diagramas para o teste de malhas para o secador de médio porte.....	157
FIGURA 5.14 – Diagrama da variação do teor de umidade médio do leito de grãos simulados para o secador de média dimensão. ....	158

FIGURA 5.15 – Diagramas da variação do teor médio de umidade do leito com o tempo de secagem. Dados obtidos da simulação em diferentes posições axial (a), radial (b) e angular (c) no secador de média dimensão. ....	159
FIGURA 5.16 – Diagramas da variação da eficiência energética (a) e exergética (b) simulados para o secador de média dimensão. ....	162

## **LISTA DE QUADROS**

QUADRO 2.1 – Equações da cinética da secagem referentes aos modelos de secagem mais comuns.....	50
QUADRO 3.1 –Valores dos coeficientes das equações de secagem na configuração computacional.....	106
QUADRO 3.2 – Condições iniciais, de contorno e parâmetros fixos para a simulação. ....	107
QUADRO 3.3 – Propriedades físicas e parâmetros variáveis para a simulação. ....	108
QUADRO 3.4 – Configurações do secador de médio porte considerado para a simulação computacional da secagem do milho.....	109

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 2.1- Teor de umidade (% bs) recomendado para o armazenamento de grãos em diferentes períodos e condições padronizadas (20° C e 65% umidade relativa) .....	34
TABELA 3.1 – Planejamento para os experimentos de secagem em camada delgada.....	82
TABELA 3.2 – Planejamento para os experimentos de secagem em camada espessa. ....	84
TABELA 3.3 – Posição dos termopares no leito de grãos. ....	85
TABELA 3.4 – Posição dos copos no leito de grãos. ....	85
TABELA 4.1 – Valores médios para as propriedades físicas do milho obtidos experimentalmente para cada teor de umidade do grão disponível para análise.....	111
TABELA 4.2 – Valores médios para as propriedades físicas do milho obtidos experimentalmente para cada teor de umidade do grão disponível.....	114
TABELA 4.3 – Valores médios do teor de umidade dos grãos e razão de umidade obtidos experimentalmente em cada teste em camada delgada .....	116

TABELA 4.4 – Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio relativo (P, %) e erro padrão da estimativa (SE) para os modelos de cinética da secagem analisados, com e sem ajuste aos dados experimentais.....	120
TABELA 4.5 – Valores para o teste qui-quadrado calculados para os modelos em análise, valores críticos e p-valor para a distribuição estatística utilizada. ....	122
TABELA 4.6 – Valores dos parâmetros do modelo de Page ajustado aos dados experimentais. ....	124
TABELA 4.7 – Queda de pressão ( $\text{Pa.m}^{-1}$ ) em coluna de milho para diferentes valores de velocidade de escoamento, temperatura do ar e teor de umidade do grão. ....	126
TABELA 5.1 – Configurações e valores dos parâmetros para o teste de convergência da malha. ....	141
TABELA 5.2 – Parâmetros estatísticos obtidos na comparação dos resultados simulados com os experimentais para o teor de umidade em cada copo.....	144
TABELA 5.3 – Valores para o desvio médio relativo (P) obtidos na comparação dos resultados simulados com os experimentais para a temperatura do ar na câmara e nos termopares 4, 7 e 10. ....	149
TABELA 5.4 – Resultados numéricos obtidos para a análise da influência da velocidade e temperatura do ar na entrada no tempo e eficiência da secagem, considerando um teor de umidade final de 12% para os grãos.....	156

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
CEFET - MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
V.C.	Volume de Controle

MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
EDP	Equação Diferencial Parcial
EDO	Equação Diferencial Ordinária
IETEC	Instituto de Educação Tecnológica
MSU	<i>Michigan State University</i>

## NOMENCLATURA

### Caracteres dimensionados

$p_{\text{grão}}$	Pressão do vapor de água na superfície do grão [Pa]
$p_{\text{ar}}$	Pressão do vapor de água no ar de secagem [Pa]
$T_0$	Temperatura inicial do ar de secagem na entrada [°C]
$M_s$	Teor de umidade do grão base seca [kg de água/kg de massa seca]
$M_u$	Teor de umidade do grão base úmida [kg de água/kg de massa úmida]
$m_s$	Massa do grão seco [kg]
$m_u$	Massa do grão úmido [kg]
$t_c$	Tempo para a umidade crítica do grão [s]
$\rho$	Massa específica. [kg/m <sup>3</sup> ]
T	Temperatura [°C]
$h$	Coefficiente convectivo da transferência de calor. [W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$c_p$	Calor específico [kJ/(kg.°C)]
$p$	Pressão de vapor; pressão do ar de secagem [Pa]

$P_{vent}$	Potência do ventilador [W]
$G$	Fluxo mássico [kg/(m <sup>2</sup> .s)]
$M_e$	Teor de umidade de equilíbrio [kg/kg]
$RH$	Umidade relativa do ar de secagem [decimal]
$h_{lv}$	Calor latente de vaporização da água [J/kg]
$W$	Umidade absoluta do ar de secagem [kg de água /kg de ar seco]
$R_m$	Razão entre a massa de material seco e a massa de ar seco [kg/kg]
$v$	Velocidade [m/s]
$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$a$	Área interfacial específica [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
$B$	Expoente da equação de Shedd [adimensional]
$n$	Direção do gradiente de pressão [adimensional]
$k_0$	Permeabilidade do meio poroso [m <sup>2</sup> ]
$\mu$	Viscosidade absoluta do ar seco [N.s/m <sup>2</sup> ]
$\vec{g}$	Vetor aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$K$	Coefficiente de permeabilidade [m <sup>4</sup> /(N.s)]
$r, \varphi, z$	Coordenadas cilíndricas: radial, azimutal e axial [m; rad; m]
$L$	Altura do leito de grãos no secador [m]
$V$	Volume [m <sup>3</sup> ]
$r_0$	Raio equivalente da partícula [m <sup>2</sup> ]
$\Omega$	Área do domínio computacional [m <sup>2</sup> ]
$\underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$	Parâmetros geométricos para o esferoide escaleno [mm]
$\underline{E}, \underline{F}, \underline{G}$	Parâmetros geométricos para o paralelepípedo retângulo [mm]
$\underline{b}$	Média geométrica entre o comprimento e a largura [mm]
$E$	Esfericidade geométrica [adimensional]

$p_v$	Pressão de vapor [Pa]
$p_{vs}$	Pressão de vapor de saturação [Pa]
$p_{sat}$	Pressão de saturação do ar de secagem [mmHg]
MR	Razão de umidade [adimensional]
SE	Erro padrão da estimativa [adimensional]
$R^2$	Coefficiente de determinação [adimensional]
P	Erro médio relativo [%]

### **Símbolos e representações**

$bs$	Base seca
$bu$	Base úmida
$a, b, c, d, n$	Parâmetros de ajustes das equações dos modelos de secagem
$a_1, a_2$	Constantes empíricas
$F$	Função desconhecida
$[R^{(e)}]$	Matriz residual do elemento
$[N]$	Matriz da função de forma
$[k^{(e)}]$	Matriz rigidez de cada elemento
$\{I^{(e)}\}$	Vetor das condições de contorno em cada elemento
$[K]$	Matriz rigidez global
$\{f^{(e)}\}$	Vetor força em cada elemento
$\{F\}$	Vetor força global
$[c^{(e)}]$	Matriz de capacitância em cada elemento
$[C]$	Matriz capacitância global

### Subscritos comuns

f	Fluido (ar)
s	Superficial
$\infty$	Distante da superfície
0	Início do processo
c	Fim da região de taxa de secagem constante
i	Inicial, instantânea
<i>grão</i>	Propriedade do grão
ar	Ar de secagem
atm	Atmosférica
$r, \varphi, z$	Coordenadas cilíndricas
ext	Externo
int	Interno
$v$	Vazios
<i>exp</i>	Experimental
<i>pre</i>	Previsto

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>22</b>
1.1 JUSTIFICATIVA	25
1.2 OBJETIVOS	26
1.3 SISTEMATIZAÇÃO GERAL DO TRABALHO	27
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>28</b>
2.1 PRINCIPAIS ASPECTOS DA CULTURA E BENEFICIAMENTO DO MILHO	28
2.1.1 A IMPORTÂNCIA DO CULTIVO DO MILHO	28
2.1.2 O MILHO CULTIVADO NO BRASIL	29
2.1.3 PROBLEMAS NA COLHEITA E PRÉ-COLHEITA DO MILHO	31
2.1.4 PROBLEMAS NA ARMAZENAGEM DO MILHO	32
2.1.5 IMPORTÂNCIA DA SECAGEM DE GRÃOS	35
2.1.6 TIPOS DE SECAGEM E SECADORES	36
2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA SECAGEM DE GRÃOS	41
2.2.1 MECANISMOS E FÍSICA DA SECAGEM	42
2.2.2 UMIDADE DE EQUILÍBRIO	47
2.2.3 MODELOS DE SECAGEM EM CAMADA DELGADA	49
2.2.4 MODELOS DE CAMADA ESPESSA	54
2.2.5 PROPRIEDADES FÍSICAS	63
2.2.6 MÉTODOS NUMÉRICOS USADOS NA SECAGEM DE PRODUTOS	64
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>66</b>
3.1 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	66
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	79
3.3 PROBLEMA FÍSICO	90
3.4 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA SOLUÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARCIAIS	103
3.5 PROCEDIMENTOS PARA A SIMULAÇÃO	104
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>111</b>
4.1 RESULTADOS PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO MILHO	111
4.2 RESULTADOS PARA A UMIDADE DE EQUILÍBRIO	113
4.3 RESULTADOS PARA A SECAGEM EM CAMADA DELGADA	116
4.4 RESULTADOS PARA OS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE SHEDD	126
4.5 RESULTADOS PARA A SECAGEM EM CAMADA ESPESSA	126

<b>5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS</b>	<b>138</b>
5.1 TESTES PARA SELEÇÃO DA MALHA	138
5.2 TESTES PARA VALIDAÇÃO DO MODELO TRIDIMENSIONAL DE SECAGEM EM CAMADA ESPESSA	142
5.3 CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO E ANÁLISE DE EFICIÊNCIAS NO SECADOR PROJETADO	150
5.4 SECADOR CILÍNDRICO DE MÉDIO PORTE	157
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>163</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>165</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>166</b>
<b>APÊNDICE A – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS</b>	<b>175</b>
<b>APÊNDICE B – FOTOS DOS EQUIPAMENTOS DE SECAGEM</b>	<b>178</b>
<b>APÊNDICE C – RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIAS</b>	<b>179</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS</b>	<b>181</b>
<b>APÊNDICE E – EQUAÇÕES PARA OS MODELOS DE CAMADA ESPESSA</b>	<b>185</b>
<b>ANEXO A - CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS</b>	<b>193</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O milho é um produto mundialmente importante, seja para consumo doméstico, exportações ou produção de bioetanol. Entretanto, a grande produção de grãos leva a necessidade de armazenagem. A capacidade de armazenamento da produção total de grãos no Brasil apresenta um déficit aproximado de 39%, sendo que apenas 15% da produção permanecem armazenadas nas propriedades, seja para consumo interno ou para posterior comercialização. Os conceitos de globalização e mercado modernos exigem que os processos produtivos se tornem competitivos em relação à qualidade dos produtos, desta forma um adequado sistema de armazenagem dos grãos é de fundamental importância na manutenção e busca de novos parceiros comerciais. Diante deste cenário a operação de secagem de grãos de milho assume um importante papel no tocante às operações de pré e pós colheita (MAIA *et al.*, 2013; COSTABILE, 2017; CONAB, 2023).

O processo de secagem do milho consiste na remoção da umidade interior dos grãos, ocorrendo por diferentes métodos, que depende principalmente da forma e das condições do produto desejado. A umidade pode ser removida por meios químicos e físicos. O método de secagem mais adotado e economicamente viável na indústria é a secagem térmica, por meio de aquecimento do produto até uma temperatura adequada usando ar aquecido como fonte de calor. (BROOKER *et al.*, 1981; SOUZA, 1996; DIAS, 2019).

A umidade é um fator preponderante para o milho, pois determina o momento adequado para colheita e as condições para armazenamento. A maturação fisiológica do milho ocorre com um teor de umidade por volta de 30% em base úmida (bu). Entretanto, acima de 25% bu os grãos podem não se soltar das espigas, enquanto abaixo de 18% bu pode ocorrer trincamento e quebra dos grãos na colheita. Os grãos de milho podem ser colhidos em condições satisfatórias quando a umidade nestes estiver entre 18 e 25% bu. Esta faixa de umidade ainda não é adequada ao armazenamento, pois favorece o ataque fúngico e formação de substâncias tóxicas (micotoxinas), levando a perdas de valor nutricional, germinativo e comercial do milho estocado. Sendo assim, para uma estocagem adequada é necessário realizar o processo de secagem dos grãos. Níveis de umidade, em base úmida, próximos a 13% são adequados para controlar estas condições de armazenamento, podendo apresentar valor de até 11% para estocagens muito longas (ELIAS, 2000; GARCIA, 2006; ELIAS *et al.*, 2017).

Os processos de secagem podem ser feitos de forma natural ou artificial. A secagem natural ocorre na própria planta, antes da colheita e sem a ação do homem, sendo os investimentos mínimos o seu principal atrativo. Para o milho alcançar o teor de umidade de armazenamento o produto deve ficar exposto ao sol por um longo tempo, causando prejuízos devido ao período de ocupação da área ser prejudicial à rotatividade de culturas, além de ficar exposto ao ataque de pragas e intempéries, tombamento de plantas e aumento das perdas durante a colheita devido ao baixo teor de água (SILVA, 2008; ELIAS *et al.*, 2017).

A secagem artificial ocorre com a interferência do homem, visando acelerar e melhorar o processo, sendo a ventilação forçada a mais eficiente. Podem ser usados secadores de diferentes tipos e silos. Nestes equipamentos a temperatura e umidade do ar de secagem podem ser controlados visando uma melhoria na taxa de secagem. Outros tipos são os secadores de fluxo contínuo e intermitentes, nestes os grãos movimentam-se pela coluna de secagem. O fluxo de ar no interior também classifica os secadores em concorrente, contracorrente ou misto (SILVA, 2008).

O milho apresenta uma grande diversidade de variedades, isto proporciona diferentes ciclos de cultivo e diferenças no processo de maturação, gerando desuniformidade na umidade dos grãos ao longo de uma área cultivada ou de uma região agrícola. Isto causa problemas críticos em relação à colheita dos grãos ao passar por uma secagem natural, evidenciando a necessidade de um controle mais efetivo das condições de secagem. Processos de transferência simultânea de calor e massa entre o ar e os grãos de milho dominam a secagem, sendo que a compreensão dos mesmos permite um melhor controle das condições de secagem, visando a preservação da qualidade dos grãos (ELIAS, 2000; ELIAS *et al.*, 2017).

Por se tratar de um produto de exportação, o alcance de padrões de qualidade do milho que atendam os exigentes padrões internacionais é fundamental para a comercialização. A secagem é uma das principais operações que estão diretamente relacionadas à obtenção de grãos de alta qualidade, sendo o seu tempo de início e duração, além do tipo de secador, fatores críticos de uma unidade de beneficiamento de grãos que apontam diretamente para o sucesso da secagem.

Os perfis de temperatura e de umidade no interior do secador podem ser examinados com precisão utilizando um método numérico conveniente, que atrelado a simulações computacionais permite uma compreensão dos processos de transferência de calor e massa entre o sólido e o fluido. Estas informações contribuem para o projeto e controle dos secadores, visando garantir as condições para o beneficiamento e estocagem dos grãos. O modelo matemático do processo de secagem em camadas é constituído de no mínimo quatro equações diferenciais parciais bem conhecidas (BALA, 2017). Entretanto, os parâmetros do produto a ser seco são generalizados para qualquer tipo de milho, sendo que, em uma destas equações utiliza-se sempre modelos propostos desenvolvidos em ambientes distintos das condições de cultivo mais frequentes no Brasil, inclusive de clima temperado e condições atmosféricas diferentes das observadas no país. Estes modelos são conhecidos como modelos de camada delgada, e as equações têm como base a transferência de calor e massa unidimensional em uma fina camada de grãos.

As simulações da secagem em camada espessa são realizadas tendo como base as equações de transferência de calor e massa, juntamente com um modelo de camada delgada adequado ao processo. Porém, é importante ressaltar que as simulações devem ser realizadas em conjunto com as experimentações, já que os experimentos fornecem informações cruciais sobre as propriedades físicas do sistema sólido-fluido, e ajudam a verificar a precisão do processo. Isto garante uma maior credibilidade nas simulações e o desenvolvimento de modelos mais realísticos.

Diante do exposto, propõe-se neste trabalho uma análise das equações de transferência de calor e massa e da taxa de secagem do milho brasileiro (cultivar BG 7640 VYH), visando obter um modelo para simulação do processo de secagem. Estas equações foram ajustadas e o modelo matemático validado usando dados obtidos experimentalmente. As simulações e os experimentos foram realizados tendo como base um secador cilíndrico com fluxo radial de ar de entrada em escala laboratorial, construído pelo autor, que foi baseado em um equipamento comercial em operação sazonal na EMBRAPA Milho e Sorgo, no município de Sete Lagoas.

## 1.1 Justificativa

A modelagem matemática e a simulação numérica do processo de secagem de grãos são de importância fundamental para o projeto e construção de novos tipos de secadores e aperfeiçoamento daqueles já existentes. Os resultados das simulações proporcionam um controle mais efetivo do processo de secagem, permitindo encontrar as melhores condições de operação e dimensionamento dos secadores, visando a redução dos custos e a qualidade do produto processado. Contudo, para que o modelo matemático seja confiável e realístico é necessário a sua validação perante dados experimentais. Diante do exposto, visto que muitas dificuldades são encontradas pelos pesquisadores para obtenção de dados experimentais em secadores industriais, a relevância deste trabalho está fundamentada nos seguintes aspectos:

**1.** Durante o desenvolvimento deste trabalho não foram observadas pesquisas de simulação tridimensional, em protótipos de secadores com admissão radial do ar. Desta forma, um modelo de secagem tridimensional baseado em equações diferenciais parciais foi validado com dados experimentais. Para obtenção dos dados foi necessário a construção de um secador, em escala laboratorial, de coluna cilíndrica com paredes vazadas. O equipamento construído localiza-se nas dependências do CEFET-MG.

**2.** Apesar de existirem muitos trabalhos de modelagem da secagem de grãos em camada espessa na literatura, não foram encontrados modelos validados nos quais os autores usam uma equação de camada delgada, ajustada experimentalmente, para a variedade específica do milho a ser seco. Nos trabalhos de pesquisa é comum os autores usarem uma equação generalizada para a secagem em camada delgada, sendo negligenciada a variedade do grão, o clima e a região de cultivo. Isto causa erros de previsão no modelo de secagem em camada espessa, pois de acordo com Souza (2015) e Zhao *et al.* (2018) as equações generalizadas representam bem o fenômeno da secagem dentro de uma margem de erros, que pode não ser aceitável de acordo com as flutuações dos valores dos parâmetros das equações.

**3.** A validação do modelo proposto confrontando os resultados numéricos com dados experimentais, permite que o secador em pequena escala seja utilizado para projetar e construir secadores de dimensões maiores em pequenas e médias propriedades rurais. Esse modelo uma vez validado pode ser utilizado para obter as condições ideais de secagem nesses equipamentos, visando melhorar a eficiência energética e favorecer o baixo consumo de energia. Desta forma, os secadores projetados com o uso do modelo proposto, permitem a armazenagem por longos períodos na própria propriedade rural, favorecendo melhores condições de comercialização e facilitando o escoamento da produção.

Assim, a proposta deste trabalho é identificar e validar um modelo tridimensional que represente com fidelidade o processo de secagem do milho mais comumente plantado no Brasil em um secador cilíndrico com fluxo radial do ar. Como consequência, esse modelo foi usado para determinação das condições de secagem ideais, obtendo melhores eficiências energética e exergética, em um secador de médio porte. Uma equação de camada delgada empírica foi ajustada experimentalmente para posterior uso nas simulações em camada espessa. Variáveis de operação tais como: velocidade de escoamento, temperatura e umidade do ar foram controladas na camada delgada e espessa obtidas no próprio sistema de secagem.

Desta forma o processo de secagem é abordado em sua plenitude. Desde a construção das colunas de secagem em camadas delgada e espessa, a obtenção de um modelo empírico de taxa de secagem, a validação do modelo matemático e simulação computacional em um secador cilíndrico com admissão radial do ar de secagem.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver uma metodologia numérica validada para simular a secagem tridimensional em secador cilíndrico com admissão radial do ar, para o principal cultivar de milho plantado no Brasil. Sendo que modelos com estas características específicas não foram encontrados na literatura.

### 1.2.1 Objetivos específicos

Para uma análise detalhada do objeto de trabalho e alcançar o que foi descrito no objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- Construir e avaliar uma coluna de secagem de dimensão laboratorial que represente a secagem do milho em camada espessa, tendo como base um secador real em operação na Embrapa;
- Construir e avaliar uma coluna de secagem de dimensão laboratorial que represente a secagem do milho em camada delgada;
- Avaliar modelos matemáticos para a taxa de secagem em camada delgada que corrobore com os dados experimentais;
- Determinar experimentalmente as propriedades físicas do milho, tais como área específica, massa e calor específicos e porosidade;

- Avaliar numericamente os processos de transferência de calor e massa para o processamento da secagem do milho em camada espessa;
- Utilizar um *software* de simulação por elementos finitos para o estudo da secagem do milho colhido nos campos da Embrapa;
- Validar os resultados numéricos confrontando com os dados experimentais obtidos no secador em escala laboratorial;
- Realizar a análise energética e exergética do secador laboratorial e de médio porte com o modelo validado.

### 1.3 Sistematização geral do trabalho

As bases iniciais deste trabalho ocorreram por meio de uma revisão bibliográfica dos temas relevantes à secagem de grãos, com foco no milho e modelagem computacional. Posteriormente, foram feitas visitas técnicas à EMBRAPA Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, onde foram coletados dados da geometria de um secador de grande porte, além do acompanhamento do processo de secagem no mesmo. Foram projetadas duas colunas de secagem, em nível laboratorial, para estudos experimentais dos modelos de camada delgada e espessa. Testes experimentais diversos foram realizados nas colunas de secagem. Em sequência aos testes, foram ajustados os modelos de camada delgada e identificada uma equação que melhor representou o fenômeno.

Equações matemáticas para propriedades físicas do milho também foram ajustadas experimentalmente. Posteriormente, foi feita a análise e validação do modelo para secagem do milho em camada espessa, e finalmente, foram realizadas simulações numéricas visando encontrar as melhores condições de secagem do milho em secador cilíndrico com admissão radial do ar de secagem.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é descrita uma breve apresentação dos aspectos gerais da cultura do milho, assim como alguns problemas durante a colheita e armazenamento dos grãos. As operações relacionadas à secagem, ao beneficiamento dos grãos e os principais tipos de secadores utilizados na agricultura são reportados. Também é abordado nesse capítulo a fundamentação teórica da secagem, onde são descritos o teor de umidade dos grãos quando em equilíbrio higroscópico com o meio de secagem, e alguns dos principais modelos matemáticos de secagem em camada delgada e espessa.

### 2.1 Principais aspectos da cultura e beneficiamento do milho

Agricultura é o setor econômico que tem a responsabilidade de garantir a alimentação humana e animal, bem como a estabilidade da economia global. Esse setor é responsável por fornecer alimentos e matérias-primas para a indústria e para outros consumidores, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Dentre os principais cultivos o milho é o mais versátil e promissor, pois pode ser cultivado em quase todos os países do mundo e é insumo para produção de diversos produtos. Entretanto, a qualidade dos grãos produzidos passa por diversas etapas, desde a escolha de uma variedade que se adapte à região de plantio até as operações necessárias para o beneficiamento e destinação final.

#### 2.1.1 A importância do cultivo do milho

Apesar de ser um produto de baixo consumo direto na mesa do ser humano, o consumo indireto do milho é de importância fundamental. De toda produção mundial de milho cerca de 70% é destinada à cadeia produtiva de suínos e aves, o mesmo cenário é observado na produção brasileira (EMBRAPA, 2015).

Os maiores produtores mundiais de milho são os Estados Unidos, China e o Brasil, entretanto, o Brasil atingiu no ano safra 2022/2023 o primeiro lugar em exportações, visto que quase a totalidade da produção americana e chinesa é destinada ao mercado doméstico (CONAB, 2023).

O milho é essencial para manter a balança comercial brasileira equilibrada, pois é amplamente utilizado na alimentação de aves e suínos, dos quais o Brasil é um grande produtor e exportador de carnes. Além disso, é importante para a alimentação de vacas leiteiras e gado de corte, no qual o Brasil também é um grande exportador.

O clima brasileiro é favorável à produção de milho, sendo cultivado em todas as regiões do país, e aliado ao fato de não demandar grandes investimentos tecnológicos, pode ser facilmente cultivado por pequenos produtores, mostrando uma importância social relevante.

A região Centro-Sul é a maior produtora de milho do país, sendo responsável por cerca de 90% de toda produção na safra 2021/2022, tendo os estados de Mato Grosso, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais os maiores produtores. Em relação à safra do período 2020/2021 houve um expressivo crescimento de 30% na produção total de milho, e um aumento de 18% nas exportações de milho (CONAB, 2023).

Uma característica peculiar do milho é a capacidade de conservar a casca durante todo o ciclo de produção até o consumo. Isto contribui para que este cereal seja uma fonte rica em nutrientes e energia, pois a casca é rica em fibras importantes para a digestão e bom funcionamento do intestino. Esta característica não é observada em concorrentes como arroz e trigo. Além disto o milho é rico em carboidratos, proteínas, vitaminas (B1 e E) e sais minerais (EMBRAPA, 2015).

### 2.1.2 O milho cultivado no Brasil

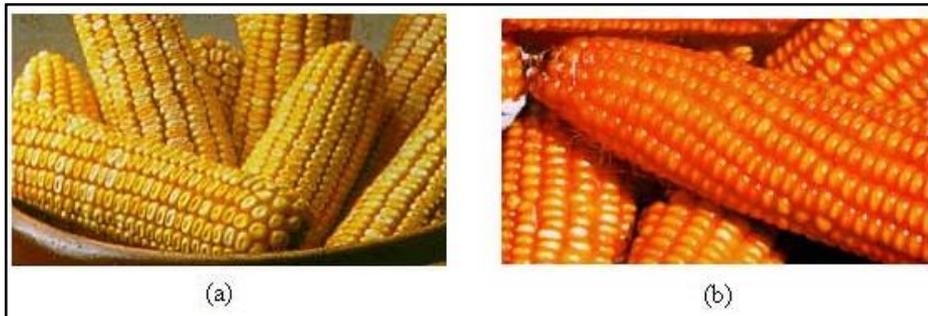
Segundo Pereira Filho e Borghi (2018) existem no Brasil cerca de 300 cultivares de milho comercializadas para a produção de grãos. Um cultivar é um conjunto de plantas melhoradas geneticamente devido à alteração ou introdução, pelo homem, de uma característica que antes não possuía (LEI Nº 9.456/1997). Estas características estão relacionadas ao aumento na produtividade, resistência às pragas e às condições ambientais da região a ser cultivada. Estas modificações também alteram a constituição interna do grão refletindo diretamente nos processos de adsorção e desorção de água.

Outra característica importante é quanto a dureza ou textura dos grãos de milho, sendo classificado em: milho dentado ou macio (FIG. 2.1a), milho duro ou *flint* (FIG. 2.1b), milho semiduro e misturado (MAPA, 2011). No Brasil cerca de 60% do milho é do tipo semiduro e 17% duro, estes tipos apresentam uma menor disponibilidade de amido na sua constituição, ao contrário de outros grandes produtores que preferem um milho mais macio.

Segundo MAPA (2011) o milho duro é caracterizado por apresentar um endosperma (região onde localiza-se o amido - FIG. 2.2) com percentual de 85% em peso de material duro ou vítreo, já o semiduro apresenta 85% do peso constituído de material intermediário (50% duro e 50% dentado). Nos Estados Unidos, China e na Europa o tipo de milho predominante é o dentado (PERES, 2001, 2003).

Em pesquisa realizada por Correa *et al.* (2002) sobre a qualidade nutricional do milho americano, 300 híbridos foram estudados, sendo que todos eram do tipo dentado, evidenciando a prevalência deste tipo no mercado internacional. A FIG. 2.1 mostra o aspecto dos dois tipos de milho mais comuns no mundo.

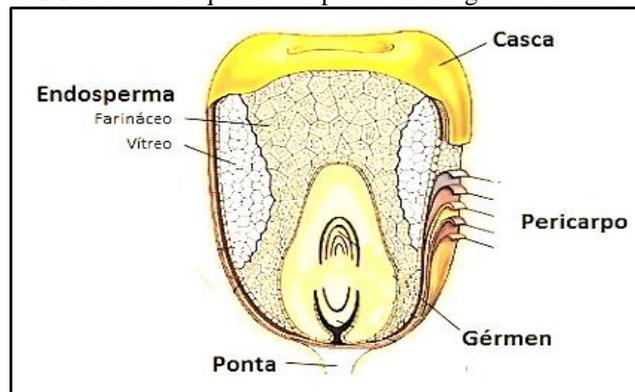
FIGURA 2.1 - Milho dentado com indentação típica no topo do grão e endosperma farináceo (a) e milho duro (*flint*) com topo do grão arredondado e alta proporção de endosperma vítreo (b).



FONTE – Peres, 2003, p.1.

Os grãos de milho do tipo dentado possuem amido mole e mais poroso e com menor densidade, o endosperma (FIG. 2.2) apresenta-se com propriedades farináceas e uma fenda ou sulco na parte superior (casca) que lembra a forma de um dente.

FIGURA 2.2 - Esquema das partes de um grão de milho.



FONTE: Adaptado de SILVA, 2019.

Os grãos duros e semiduros apresentam uma textura vítrea, parte destas características são observadas durante o período de maturidade fisiológica do grão, onde a perda de umidade ocorre de forma a reduzir o volume do grão, esta contração ocorre na parte do endosperma macio e farináceo (FIG. 2.2) aumentando o percentual de endosperma duro e deixando os grãos mais cristalinos.

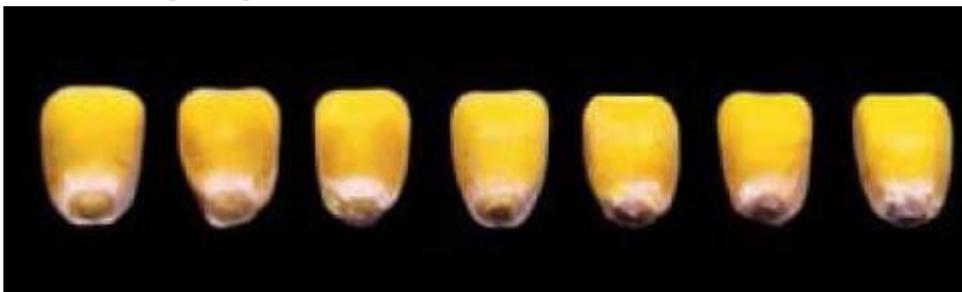
### 2.1.3 Problemas na colheita e pré-colheita do milho

A colheita é uma fase muito importante no processo de produção do milho, pois se realizada dentro de condições adequadas pode representar uma melhoria nos ganhos e redução de perdas. A época de colher o milho deve ser devidamente analisada, levando em consideração fatores fisiológicos da planta e os ambientais. Geralmente a colheita do milho ocorre entre 90 a 100 dias após a semeadura, mas este período pode variar devido principalmente as condições ambientais e a disponibilidade de secadores. A priori a observação é a melhor forma de analisar o tempo certo de colher.

O teor de umidade do grão é um outro parâmetro que determina o momento adequado de colher o milho. A maturidade fisiológica da planta é o ponto ideal para a colheita, ou seja, quando todos os grãos da espiga atingem seu máximo acúmulo de matéria seca e, portanto, maior nível de qualidade em nutrientes. Este período ocorre entorno de 60 a 65 dias após o florescimento, e pode ser observado quando 50% dos grãos na espiga apresentarem uma pequena mancha preta no ponto de inserção com o sabugo (FIG. 2.3). Entretanto, o milho apresenta nesta fase cerca de 30-38% de umidade e não está em condições de ser colhido e armazenado com segurança (EMBRAPA, 2015). Para Portella e Eichelberger (2001), o principal fator causador de perdas na colheita do milho é a manutenção da planta no campo após o período de maturidade fisiológica visando a redução da umidade.

A exposição da planta a intempéries além do período de maturidade do grão deixa o produto acessível ao ataque de gorgulhos, traças, pássaros e demais pragas comuns nas lavouras de grãos. A infestação destas provoca a perda de nutrientes do milho e um produto de pior aceitação pelos animais a serem alimentados. Os ventos proporcionam o tombamento das plantas, e o excesso de água devido às chuvas leva à germinação e apodrecimento do grão ainda na espiga. A perda da sustentação torna o produto susceptível ao ataque de roedores, além do apodrecimento em contato com o solo. Desta forma, durante a pré-colheita haverá uma iminente necessidade de aplicação de defensivos agrícolas para controle destas pragas, onerando a produção final (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001; EMBRAPA, 2015).

FIGURA 2.3 - Avanço da macha escura em grãos de milho em maturidade fisiológica. Queda do teor de umidade da esquerda para a direita.



FONTE – ENDICOTT *et al.*, 2015, p.18.

O retardo na colheita proporciona um aumento de concorrência pelo espaço físico nas plantações, devido ao crescimento de ervas daninhas que se infestam entre as fileiras emaranhando-se aos pés de milho. Isto causa problemas durante a colheita mecanizada, tais como debulha ineficiente e obstrução no interior das colheitadeiras, além de aumentar o grau de impurezas no acondicionamento do produto. Em casos de períodos mais longos de pré-colheitas, as ervas daninhas retiram o nitrogênio que a princípio deveriam suprir o milho cultivado. Esta competição por nutrientes afeta a qualidade energética do milho, levando a uma necessidade de reposição com adubação nitrogenada, e tornando mais onerosa a produção (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001; EMBRAPA, 2015). Estes problemas críticos na produção do milho podem ser reduzidos com a utilização de um sistema de secagem de grãos interligado às outras operações unitárias dentro da própria propriedade rural.

#### 2.1.4 Problemas na armazenagem do milho

O crescimento da população mundial obriga o setor agrícola a aumentar a produção de alimentos para suprir a demanda alimentícia. Desta forma, a capacidade de prolongar a conservação de alimentos até o consumidor final, é uma operação iminente para o escoamento regular da safra de produtos da agricultura. O armazenamento correto da produção é de fundamental importância para atender esta demanda crescente, além de ser um recurso utilizado para equilibrar a oferta de grãos em períodos de safra e entressafra, visando a regularidade do abastecimento e estabilidade dos preços. Como a balança comercial brasileira tem uma importante participação do setor de grãos, a necessidade de ampliar as pesquisas no tocante ao armazenamento destes é perceptível, sendo inerente a evolução no processo de secagem associado a toda rede de beneficiamento.

O armazenamento é uma técnica que tem por objetivo manter os grãos estocados por determinados períodos de tempo, em excelente estado de conservação, para posterior distribuição às indústrias beneficiadoras nacionais ou escoamento para os portos exportadores. A capacidade de armazenamento estática de um país grande produtor de grãos deve estar próxima de 120% de toda a sua produção, ou uma razão de 1: 1,2 (produção x armazenagem). Nos Estados Unidos esta razão chega a 1:2,5 em termos de comparação. Entretanto, a capacidade de armazenamento no Brasil não acompanha a crescente produção de grãos, gerando perdas significativas no agronegócio nacional (MAPA, 2019). Segundo Costabile (2017), apenas 77% de toda colheita de grãos nacional tem capacidade estática de ser estocada. Este déficit causa problemas críticos de congestionamentos nas estradas e pátios de escoamento imediato.

Entretanto, o armazenamento de grãos não se resume a apenas uma grande capacidade estática, mas também às práticas adequadas. A estocagem inadequada de grãos e a falta de infraestrutura e conhecimento técnico, causam perdas que podem chegar a 25% da produção nas fazendas e cooperativas (COSTABILE, 2017).

A maioria das perdas na armazenagem está relacionada à colheita inadequada, mal funcionamento de maquinários, transporte, e ausência ou ineficiência da secagem. Estas perdas podem ser substancialmente reduzidas com o uso de técnicas de secagem e armazenamento adequadas na própria propriedade agrícola produtora de grãos (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001). As operações de armazenamento e manutenção da qualidade dos grãos estão intimamente ligadas ao teor de umidade presente no grão. A TAB. 2.1 mostra o conteúdo de umidade limite no grão para diferentes períodos de armazenamento, para diversas culturas agrícolas. Como pode ser visto, para o milho o teor de umidade varia entre aproximadamente 12 e 16% bs (base seca), este valor é quase a metade do teor que o milho apresenta em seu estado de maturidade fisiológica.

A umidade presente no milho em armazéns e silos de estocagem, quando muito elevada, proporciona altas taxas de atividade metabólica para os micro-organismos presentes na massa. Estas condições são propícias ao surgimento de fungos e insetos que levam à rápida deterioração da massa do milho.

TABELA 2.1- Teor de umidade (% bs) recomendado para o armazenamento de grãos em diferentes períodos e condições padronizadas (20° C e 65% umidade relativa)

Grão	Período de armazenamento (meses)			
	06	12	24	60
Feijão	16,9	15,6	14,3	13,0
Milho	16,3	14,9	13,6	12,4
Trigo, sorgo, arroz	15,6	14,3	13,0	11,7
Azevem	14,9	13,6	12,4	11,1
Soja	14,3	13,0	11,7	10,5
Amendoim	13,6	12,4	11,1	9,9
Canola	9,9	8,7	7,5	7,5

FONTE: Adaptado de Elias (2000), pag. 115.

Outros danos físicos podem ocorrer nos grãos, tais como: descoloração, redução do conteúdo de proteínas, carboidratos e açúcares. Além destes, os fungos podem produzir micotoxinas que se agregam a matéria seca do milho e permanecem presentes até o consumo final (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001; EMBRAPA, 2015).

O desenvolvimento de fungos é o principal dano causado pela secagem tardia, incompleta ou ineficiente dos grãos de milho. Os gêneros de fungos do milho e demais grãos reproduzem-se por esporos, que são formas resistentes e germinam quando as condições são favoráveis. Estas condições ocorrem quando a umidade relativa do ar do ambiente está acima de 65%, a umidade dos grãos acima de 14% e temperatura entre 24 a 40° C. A principal micotoxina produzida por fungos no milho é a aflatoxina, esta afeta irreversivelmente o fígado dos animais, causa redução no crescimento e mal funcionamento de órgãos, além de ser carcinogênica para os seres humanos. Rações contaminadas provocam a queda da produção animal, e a aflatoxina pode estar presente nos produtos como leite, carne, ovos e derivados, que acumula no organismo humano pelo consumo continuado. (SOUZA, 2012).

Grande parte da produção brasileira de grãos é originada em propriedades pequenas ou médias onde a secagem não é feita, e a colheita é atrasada até a umidade atingir níveis de armazenamento. A estocagem também é feita de forma inadequada em paióis ou depósitos, ficando o produto sujeito ao ataque de roedores, pássaros e fungos. Nestes estabelecimentos rurais o milho produzido deve ser comercializado imediatamente após a colheita, sendo que os proprietários ficam obrigados a vender seus produtos na safra, quando historicamente os preços são menores. Sem a possibilidade de estocagem de produtos os agricultores ficam sujeitos às condições desvantajosas impostas por intermediários, reduzindo a rentabilidade econômica da lavoura (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001).

Portanto, de acordo com os parágrafos anteriores a maioria dos problemas relacionados ao armazenamento de milho pode ser sanado com a adequação de um sistema de secagem de grãos para as propriedades rurais, que aliado a uma análise crítica de custo-benefício agregará valor ao produto final dos agricultores, aumentando o retorno econômico.

### 2.1.5 Importância da secagem de grãos

Tanto para grandes como pequenos produtores o processo de secagem é inerente ao beneficiamento dos grãos, destacando-se como vantagens: permitir antecipar a colheita e disponibilizar a área para novos cultivos, minimizar as perdas no campo, permitir longas armazenagens sem risco de deterioração, assegurar a manutenção do poder germinativo das sementes por longos períodos e evitar a proliferação de insetos e microrganismos.

O crescimento da produção brasileira de milho observado nas últimas safras (CONAB, 2023), torna a secagem uma operação de importância crucial na obtenção de um produto com qualidade e umidade adequada para a comercialização.

A secagem é uma técnica que deve ser controlada visando obter o máximo de aproveitamento energético dos grãos e um maior tempo possível de armazenagem. Segundo Weber (2005) para garantir uma qualidade dos grãos o máximo de umidade que pode ser retirada equivale a aproximadamente 90% de todo o conteúdo de umidade do grão. A água retirada está presente na superfície e nos interstícios granulares, o restante corresponde a água ligada quimicamente aos componentes dos grãos, tais como vitaminas, proteínas, carboidratos e gorduras e deve ser mantida na secagem.

O controle da temperatura dos grãos e do ar de secagem são outras variáveis que devem ser bem monitoradas, pois limitam a qualidade dos grãos obtidos no processo. Segundo Portella e Eichelberger (2001) a temperatura muito elevada aumenta o gradiente de umidade no interior do grão e gera tensões internas que levam ao trincamento, aumento da susceptibilidade à quebra e alteração do conteúdo nutritivo dos grãos. Para os mesmos quanto maior o nível de umidade no grão menor deve ser a temperatura de secagem, evitando assim danos térmicos. No caso do milho alimentar a temperatura não deve exceder os 70°C quando a umidade estiver entre 20-30%, podendo em alguns casos ser elevada gradativamente até próximo dos 80°C quando a umidade estiver em 14%, já para sementes pode-se chegar até 45°C (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001; SILVA, 2008).

### 2.1.6 Tipos de secagem e secadores

Os processos de secagem podem ser feitos de forma natural ou artificial. A secagem natural ocorre na própria planta antes da colheita, sem a ação do homem e os investimentos mínimos são o principal atrativo (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001). Para o milho alcançar o teor de umidade de armazenamento, o produto deve ficar exposto por longo tempo, causando prejuízos devido ao período de ocupação da área ser prejudicial à rotatividade de culturas, além de ficar exposto ao ataque de pragas e intempéries, tombamento de plantas e aumento das perdas durante a colheita devido ao baixo teor de água.

A secagem artificial ocorre com a interferência do homem, visando acelerar e melhorar o processo, sendo a ventilação forçada a mais eficiente. Podem ser usados secadores na vertical e na horizontal. Nestes equipamentos a temperatura e umidade do ar de secagem podem ser controlados visando uma melhoria na cinética da secagem. Entretanto, a diversidade de culturas de milho existentes proporciona produtos com umidades muito distintas e um controle mais efetivo das condições de secagem deve ser realizado no secador, preservando a qualidade dos grãos e aumentando a eficiência energética do equipamento. (ELIAS, 2000; ELIAS *et al.*, 2017).

#### 2.1.6.1 Classificação geral dos secadores

Os secadores são equipamentos construídos sob diversas formas e operações visando a realização do processo de secagem artificial de grãos em sua plenitude. Para a realização da secagem artificial é necessário o consumo de energia devido ao aquecimento e a movimentação do ar. Portanto, o custo deve ser levado em consideração no projeto de construção de secadores. Os gastos com a secagem são balanceados por um aumento na produtividade da lavoura e na qualidade dos grãos. Aliado a uma disponibilidade de mão-de-obra e apoio técnico de instituições governamentais, o processo de secagem torna-se economicamente viável para produtos de grande safra, como é o caso do milho.

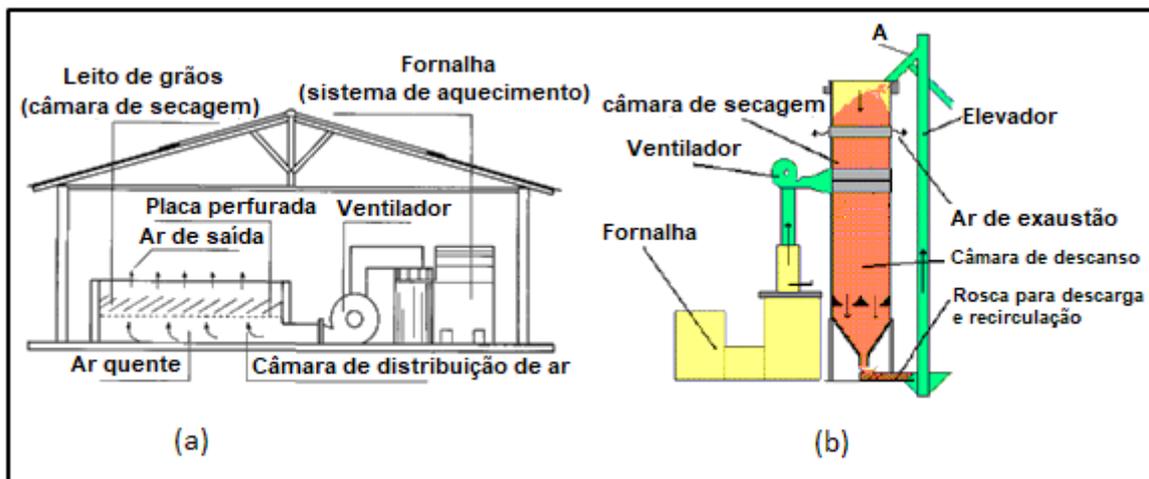
Existem diversas características a serem observadas para classificar os secadores. Neste item os secadores foram agrupados em relação ao sistema de funcionamento para carga e descarga, quanto ao sentido do fluxo do ar e a geometria da torre de secagem. Para tanto foram utilizadas as definições dadas por Silva (2008), Bortolaia (2011) e Dias (2019).

Os secadores podem ser classificados quanto ao sistema de carga e descarga em:

- Estacionário;
- Contínuo;
- Intermitente.

Nos secadores estacionários (FIG. 2.4a), também chamados de leito fixo, os grãos descarregados no interior da coluna de secagem permanecem estáticos durante a operação, o ar quente escoou pelo leito de grãos insuflado por um ventilador. Nos tipos contínuos e intermitentes (FIG. 2.4b) ocorre uma movimentação constante dos grãos no interior da câmara de secagem. Nos secadores contínuos ocorre apenas uma passagem dos grãos ao longo da coluna, enquanto que no tipo intermitente ocorre a recirculação dos grãos no interior da coluna, passando várias vezes pela mesma até o nível de umidade desejado.

FIGURA 2.4 - Classificação de secadores quanto ao sistema de carga. (a) Secador de leito fixo de grãos. (b) Secador não estacionário, se no ponto A ocorrer recirculação têm-se secador intermitente, caso contrário secador contínuo.



FONTE: Adaptado de SILVA, 2008, p.125; DIAS, 2018, p. 30

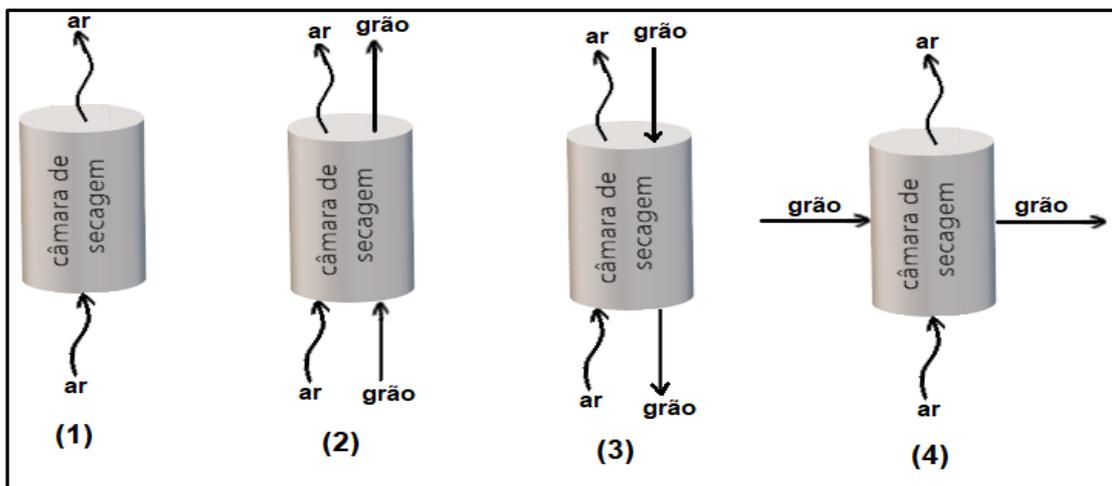
Quanto ao sentido do fluxo de ar de entrada na secagem os secadores podem ser classificados em:

- Concorrente;
- Contracorrente;
- Cruzado;
- Misto.

Os grãos podem seguir um fluxo vertical ascendente ou descendente. Este tipo de classificação é uma subclasse dos secadores contínuos e intermitentes, pois relaciona o sentido do fluxo do ar de secagem e do grão em movimento na coluna de secagem.

No secador de fluxo concorrente tanto o ar quanto o grão seguem o mesmo sentido, no fluxo contracorrente os sentidos são contrários e no fluxo cruzado ar e grão seguem uma trajetória perpendicular e cruzam-se em um determinado momento. Os secadores de fluxo misto podem apresentar dois ou mais tipos de fluxos. Em leito fixo ocorre apenas um tipo de fluxo. A FIG. 2.5 apresenta como ocorrem estes fluxos no interior do secador.

FIGURA 2.5 - Classificação de secadores quanto ao fluxo do ar de secagem. (1) Fluxo em leito fixo. (2) Concorrente. (3) Contracorrente. (4) Fluxo cruzado



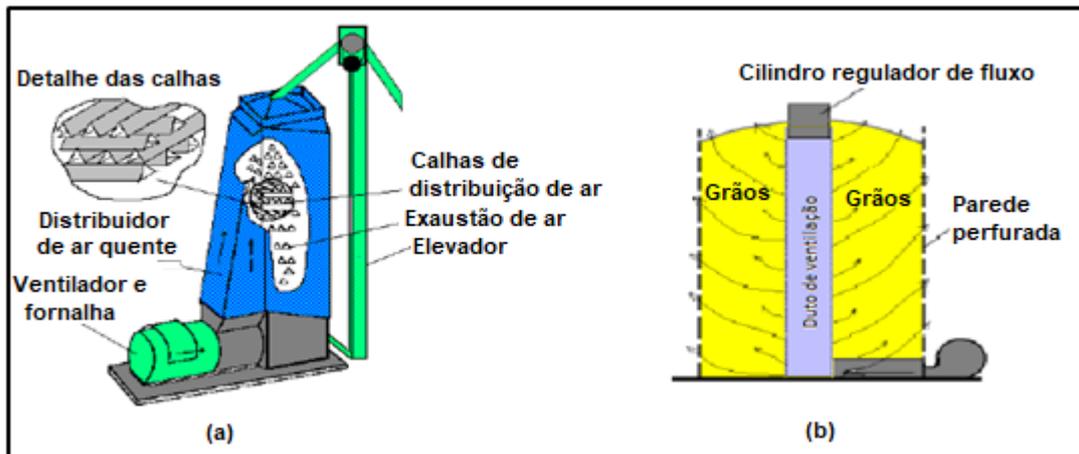
FONTE: Próprio autor

A torre de secagem é a principal parte do secador, pois o ar escoará ao longo do comprimento e entrará em contato com os grãos, esta torre pode apresentar diferenças geométricas na sua constituição interna para maximizar o potencial de secagem de um determinado grão ou produto. Nessa parte os secadores podem ser do tipo:

- Secador de calhas paralelas ou em cascata;
- Secador de calhas cruzadas;
- Secador de coluna com difusor de ar central.

O secador em cascata é constituído por calhas dispostas de forma paralela ou na transversal no interior do secador (FIG. 2.6a). Os grãos movimentam-se na descendente sob a ação da gravidade, o ar escoar pelos grãos em diversos sentidos, estes apresentam uma elevada eficiência energética e um elevado custo. Em um típico secador de coluna (FIG. 2.6b) os grãos permanecem estáticos com a entrada de ar quente ocorrendo por um duto localizado no centro da coluna, este tipo de secador será abordado no item 2.1.6.2.

FIGURA 2.6 - Classificação de secadores quanto a geometria interna. (a) Secador em cascata. (b) Secador de coluna com difusor de ar central.

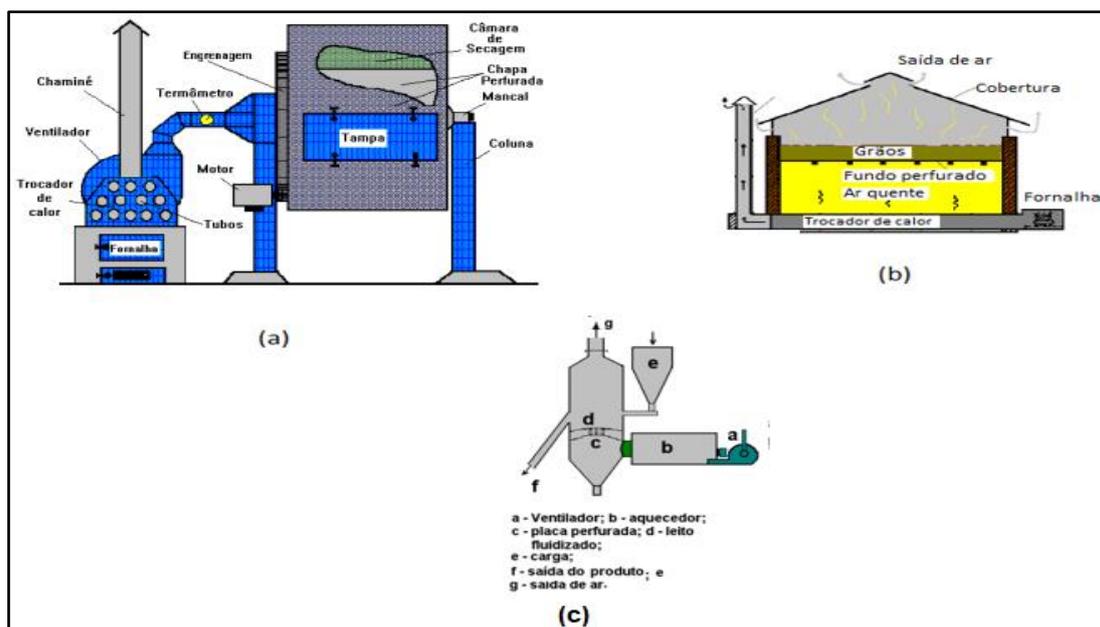


FONTE: SILVA, 2008, p.121-128

Três outros tipos de secadores merecem destaque devido apresentarem elevada eficiência na secagem ou baixo custo de construção: o secador rotativo, secador por convecção natural e secador de leito fluidizado.

O secador rotativo é constituído por um cilindro longitudinal que gira em torno do seu eixo (FIG. 2.7a), o ar de secagem entra concorrente ou contracorrente ao fluxo de produto. Muito usado na secagem de café, fornece uma secagem bem uniforme, mas uma baixa eficiência energética. Nos secadores por convecção natural (FIG. 2.7b) o movimento do ar ocorre devido a uma diferença de pressão produzida pela diferença de temperatura e umidade entre o ar de secagem e o ambiente. O ar de secagem entra lateralmente na parte inferior. São de baixo custo e aplicáveis a pequenas produções, mas apresentam baixa eficiência e risco iminente de contaminação do produto pela fumaça da fornalha. No secador de leito fluidizado (FIG. 2.7c) o ar atravessa uma placa perfurada na parte inferior provocando turbulência no produto, que se encontra sobre ela. Os grãos flutuam sobre a placa em direção à saída. São de baixa capacidade de secagem e exige ventilador de alta potência.

FIGURA 2.7 - Outros tipos de secadores. (a) Secador rotativo. (b) Secador por convecção natural. (c) Secador de leito fluidizado.



FONTE: SILVA, 2008, p.130-132

O secador em leito fixo apresenta muitas vantagens em relação aos outros sistemas de secagem, tais como: capacidade variável, investimento relativamente baixo e aplicação como silo de estocagem após a secagem. O secador de leito fixo com admissão radial do ar de secagem é o objeto de estudo deste trabalho de doutorado e será abordado em maiores detalhes no próximo subitem.

#### 2.1.6.2 Secador cilíndrico de leito fixo

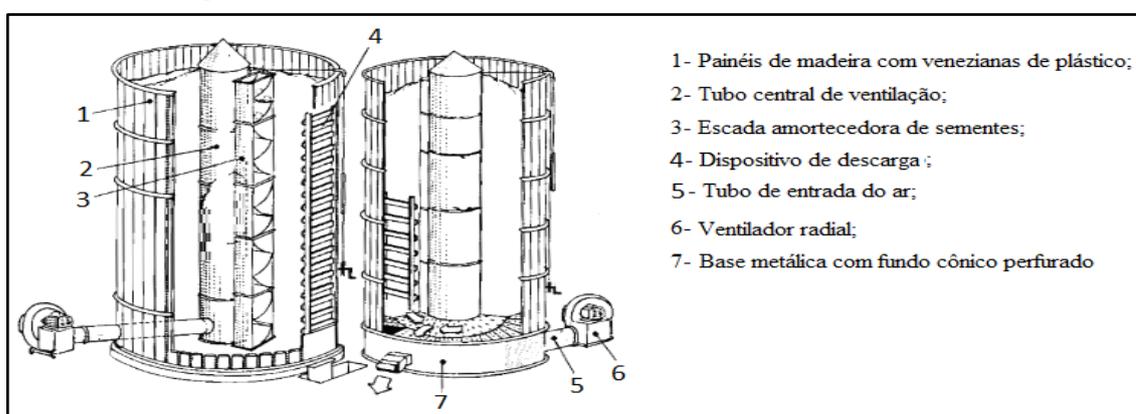
O projeto de construção de uma coluna de secagem em escala de laboratório para estudar a secagem de milho em camada espessa, teve como origem um secador cilíndrico de leito fixo em operação sazonal na usina de beneficiamento de grãos na EMBRAPA, sediada em Sete Lagoas – MG.

Este tipo de secador tem uma importância fundamental na implementação do processo de secagem em propriedades rurais, pois pode ser construído com materiais mais comuns e muitas vezes disponíveis no campo. O investimento é menor quando comparado aos outros secadores comerciais, pois requer pouca tecnologia e mão-de-obra. A secagem é feita em batelada, o que permite ser projetado para pequenos ou grandes volumes de grãos. (BORTOLAIA, 2011; DIAS, 2019).

Nestes secadores a secagem dos grãos ocorre de forma heterogênea, sendo que os grãos localizados na parte mais próxima à entrada de ar são secos mais rapidamente em relação aos outros (BORTOLAIA, 2011; DIAS, 2019).

O secador proposto para estudo tem entrada radial de ar ao longo de uma coluna em contato direto com os grãos, isto proporciona uma secagem diferenciada e mais homogênea. Desta forma, um modelo de secagem em camada espessa faz-se necessário para interpretação correta do fenômeno nas simulações. A FIG. 2.8 mostra algumas partes do secador cilíndrico de leito fixo de grande porte.

FIGURA 2.8 - Esquema de secador cilíndrico de leito fixo com admissão radial de ar.



FONTE: SOUZA, 1996, p.13

O ar é aquecido por uma fornalha e ventilado através de um duto para dentro do secador pela parte inferior. No duto central de ventilação o ar escoar na direção radial de forma que o fluxo passe pelo material a ser seco. Ao passar através da camada de grãos o ar tende a perder temperatura e a ganhar umidade, retirando água das sementes e elevando a temperatura das mesmas. A saída natural do ar é feita pelas laterais do secador, através de venezianas de plástico, e pela parte superior que se encontra aberta ao ambiente.

## 2.2 Fundamentação teórica da secagem de grãos

Apesar da possibilidade de retirar a umidade de alguns produtos usando substâncias químicas que absorvem a água, a secagem é uma operação essencialmente térmica quando direcionada à grãos. Assim sendo, pelo menos dois processos principais ocorrem simultaneamente durante a secagem: a transferência de calor do ambiente externo para o interior do grão e a transferência de massa (umidade) do interior do grão para o ambiente externo por evaporação. Outros processos relacionados a transformações físicas e químicas na estrutura do grão também podem ocorrer em alguns casos, entretanto, não fazem parte do escopo deste trabalho.

A secagem é uma operação que engloba o pré-processamento de produtos agrícolas visando a retirada de parte de água confinada no interior da massa sólida. A remoção de umidade irá ocorrer até que o produto fique em equilíbrio higroscópico com o ambiente onde será armazenado. Entretanto esta operação deve ser realizada preservando a integridade física, aparência e qualidade nutricional dos produtos (SILVA, 2008). O tratamento físico e matemático relacionado ao processo de secagem será demonstrado nesta seção do capítulo.

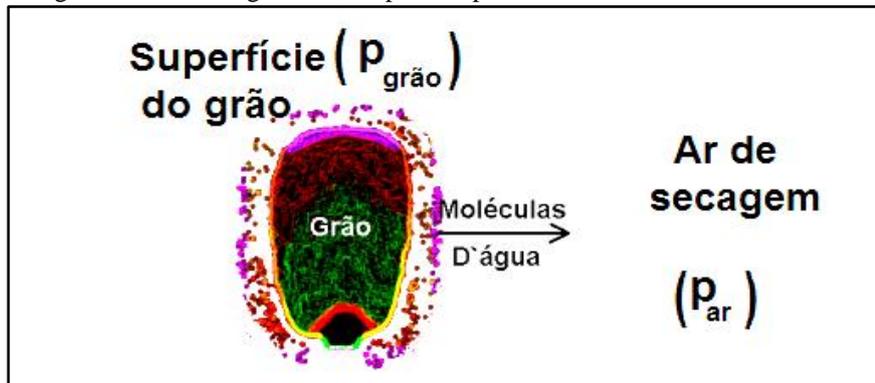
### 2.2.1 Mecanismos e física da secagem

Os mecanismos fundamentais de transferência de umidade em grãos podem ocorrer devido ao escoamento de água no interior de capilares, gradientes de concentração ou pressão parcial grão-ambiente e por difusão de líquido em camadas de adsorção. (DINÇER E ZAMFIRESCU, 2016). Os dois mecanismos inicialmente citados serão descritos em uma abordagem microscópica da secagem.

O mecanismo de escoamento da água no interior de capilares é dividido em quatro estágios. O primeiro estágio é caracterizado pelo produto completamente úmido e com temperatura igual a de evaporação natural da água no ar (temperatura de bulbo úmido). O escoamento ocorre de uma região a outra do grão devido a diferença de concentração aquosa (gradiente hidráulico). A água encontra-se livre e evapora-se naturalmente até o equilíbrio com o ambiente externo. No segundo estágio a água deixa de comportar-se como livre, ocorre o escoamento com a formação de pontes líquidas (água confinada entre camadas adjacentes de massa sólida) com característica capilar, o produto atinge temperaturas superiores á de bulbo úmido e uma pequena parte de água já escoou na forma de vapor. No terceiro estágio a água de poros adjacentes migra-se pelas paredes dos capilares vazios, ocorre a evaporação e condensação sucessivamente entre pontes líquidas, a pressão parcial do vapor decresce e ocorre contração do volume dos grãos. No último estágio o vapor escoou de forma intermitente, a secagem no interior do produto ocorre continuamente até atingir a umidade de equilíbrio, neste momento a quantidade de água evaporada é igual a condensada, finalizando o processo granular (SILVA, 2008).

No mecanismo devido a um gradiente de pressão parcial a movimentação de água ocorre de acordo uma diferença na pressão de vapor entre a superfície do grão a ser seco e o ar ambiente de secagem. A FIG. 2.9 ilustra o processo de movimentação da água durante a secagem. A situação para que a umidade seja retirada do grão durante a secagem estabelece que a pressão do vapor da água na superfície do grão ( $p_{\text{grão}}$ ) deve ser maior do que no ar de secagem ( $p_{\text{ar}}$ ).

FIGURA 2.9 - Movimento da água na superfície do grão durante o processo de secagem devido a um gradiente de pressão parcial.



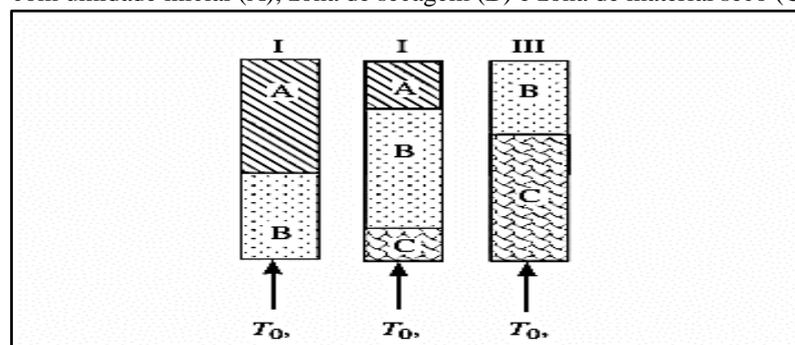
FONTE: Adaptado de SILVA, 2008, p.110.

Nas condições anteriores, o grão será seco pelo ar de secagem até que a pressão parcial da água na superfície do grão se torne igual à do ar de secagem, esta condição representa o equilíbrio higroscópico. Quando o ar de secagem apresentar uma pressão de vapor maior em relação à superfície do grão, ocorrerá a adsorção de água pelo produto e o mesmo tornará mais úmido.

### 2.2.1.1 Secagem de grãos em camadas

O entendimento do processo de secagem em camadas de grãos é complexo, pois envolve o escoamento da fase gasosa através de camadas intersticiais, a transferência de calor entre o ar de secagem e o material granulado e a transferência de massa (vapor de água) da fase sólida para a fase gasosa (DINÇER e ZAMFIRESCU, 2016). Para uma melhor interpretação destes fenômenos a secagem de grãos em camadas é dividida em três etapas principais, conforme mostrado na FIG. 2.10.

FIGURA 2.10 - As três etapas da secagem em camadas. Zona de material com umidade inicial (A), zona de secagem (B) e zona de material seco (C).



FONTE: DINÇER e ZAMFIRESCU, 2016, p.87

Na etapa I duas zonas distintas coexistem (**A** e **B**), na zona **A** o material permanece com teor de umidade inicial e na zona **B** ocorre a secagem do material. A zona **B** aumenta de forma contínua e o teor de umidade do produto varia com o tempo na direção vertical.

Na etapa II uma nova zona **C** aparece, nesta zona o material apresenta-se seco e com teor de umidade igual a umidade de equilíbrio. Durante o tempo de secagem a zona **A** diminui continuamente até desaparecer, e de forma análoga a zona **C** aumenta.

Na etapa III apenas as zonas **B** e **C** permanecem no leito de grãos, a altura da zona **C** aumenta até que todo o produto presente na camada atinja a umidade de equilíbrio. Para camadas delgadas ou baixas temperaturas do ar de secagem, a ocorrência da etapa II pode ser desconsiderada (DINÇER e ZAMFIRESCU, 2016).

#### 2.2.1.2 Análise de curvas típicas da secagem

Em um processo de secagem o teor de umidade dos grãos é geralmente determinado com base no material seco ou no material úmido. A utilidade de ambos os termos é bastante ampla e varia de acordo com a situação a ser interpretada. Em muitas curvas de secagem a utilização do teor em base seca é mais usado. Já em artigos voltados para a área agrícola o uso de base úmida é comum. Durante este trabalho os dois termos são usados e as definições de ambos são dadas.

O teor de umidade em base seca ( $M_s$ ), representado pela EQ. (2.1), é dado pela diferença entre a massa dos grãos úmidos ( $m_u$ ) e secos ( $m_s$ ) dividido pela massa dos grãos secos. Já o teor em base úmida ( $M_u$ ), representado pela EQ. (2.2), é dado pela diferença entre a massa dos grãos úmidos e secos dividido pela massa dos grãos úmidos.

$$M_s = \left( \frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \quad (2.1)$$

$$M_u = \left( \frac{m_u - m_s}{m_u} \right) \quad (2.2)$$

O teor de umidade em base seca pode ser convertido em base úmida e vice-versa pelas equações:

$$M_s = \left( \frac{M_u}{1 - M_u} \right) \quad (2.3)$$

$$M_u = \left( \frac{M_s}{1 + M_s} \right) \quad (2.4)$$

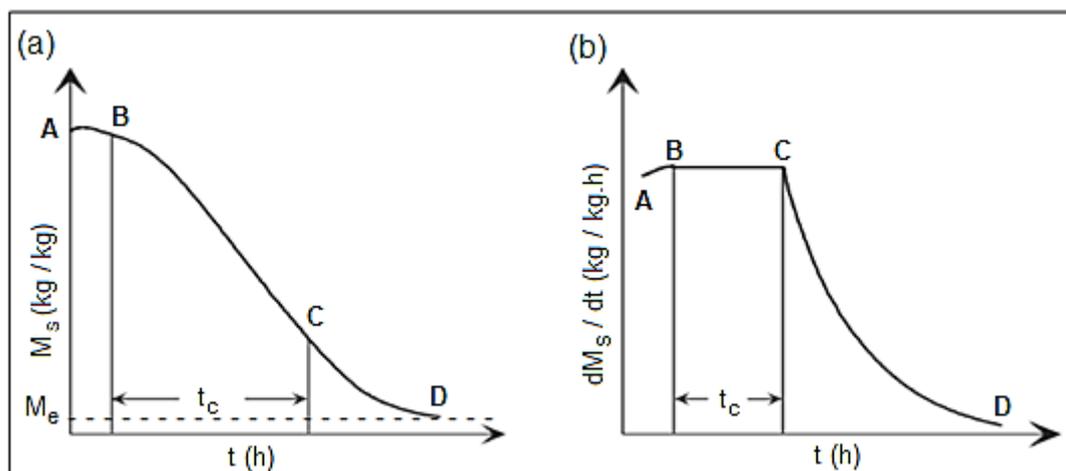
Uma grandeza muito útil nos trabalhos de secagem é a razão de umidade (MR), pois permite a comparação de experimentos realizados em diferentes valores de umidade inicial, e pode ser dada na forma

$$MR = \frac{(M_s - M_e)}{(M_i - M_e)} \quad (2.5)$$

em que  $M_i$  e  $M_e$  representam os teores de umidade inicial e de equilíbrio, respectivamente, para um processo de secagem característico.

A FIG. 2.11a mostra a variação típica do teor de umidade durante a secagem para um caso geral em que um sólido úmido perde umidade. Durante a secagem de um sólido úmido em ar aquecido, o ar fornece o calor latente de evaporação necessário à umidade, além de atuar também como gás de arraste na remoção do vapor de água formado nas proximidades da superfície dos grãos (SAHNI E CHAUDHURI, 2012; DINÇER E ZAMFIRESCU, 2016).

FIGURA 2.11 - - Curvas típicas para a cinética da secagem de produtos agrícolas. (a) Conteúdo de umidade em função do tempo. (b) Taxa de secagem em função do tempo



FONTE: Adaptado de DINÇER E ZAMFIRESCU, 2016, p.68

Na primeira parte do processo, representada pela curva **A-B** (FIG. 2.11), a transferência de massa na superfície sólida é dominante. Este é um estágio de aquecimento do sólido, durante o qual as condições da superfície sólida ainda não se equilibraram com o ar de secagem. Durante este período o material úmido pode até mesmo absorver umidade ao invés de ser seco, dependendo das condições reais. De forma geral a umidade se difunde para fora do produto. Aqui, os processos de transferência de calor (difusão e convecção) são essencialmente transientes (SAHNI e CHAUDHURI, 2012).

Na segunda parte das curvas, representada por **B-C**, ocorre uma redução do teor de umidade que é aproximadamente linear no tempo (FIG. 2.11a). Durante esta fase a área da superfície saturada de umidade diminui gradualmente, a taxa de remoção de água por unidade de superfície é essencialmente constante (FIG. 2.11b). No ponto **C** ocorre o término do período de taxa constante e é conhecido como ponto de umidade crítica, sendo  $t_c$  o tempo entre o início da secagem até a umidade crítica. Ainda neste período **B - C**, o movimento da umidade dentro do sólido é tão grande quanto a taxa de evaporação na superfície, mantendo uma condição saturada em umidade, e a taxa de secagem é controlada pela taxa na qual o calor é transferido para a superfície. Os coeficientes de transferência de calor e massa, além do gradiente de temperatura e umidade são parâmetros que podem ser usados para um controle efetivo desta etapa de secagem (DINÇER e ZAMFIRESCU, 2016).

A partir do ponto **C** e seguindo no trecho **C-D** nas curvas do FIG. 2.11, a condição de saturação de umidade na superfície do grão não é mais mantida e a taxa de secagem é decrescente (FIG. 2.11b). Desta forma não há evaporação na superfície, mas essencialmente, um processo de difusão da umidade dentro do sólido seguido por uma transferência de massa convectiva na superfície sólida. Iniciando-se no ponto **C** a temperatura da superfície do grão começa a aumentar com a secagem, aproximando-se da condição de equilíbrio térmico e higroscópico com o ar de secagem (perto do ponto **D**). Portanto, quando o teor de umidade inicial está acima do teor crítico de umidade, o processo de secagem pode ser feito sob condições de taxa constante. Se estiver abaixo do teor crítico de umidade, todo o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente (SAHNI E CHAUDHURI, 2012; DINÇER E ZAMFIRESCU, 2016).

As curvas representadas pelo FIG. 2.11 são comumente conhecidas como cinética da secagem, pois estabelecem as mudanças no conteúdo médio de umidade do produto com o tempo. A cinética de secagem permite calcular a quantidade de umidade evaporada, o tempo de secagem, o consumo de energia e assim por diante. Estas dependem das propriedades físico-químicas do material e dos processos de transferência de calor e massa.

### 2.2.2 Umidade de equilíbrio

A secagem ocorre de forma contínua até um limite inferior de umidade no grão, onde a cinética da secagem torna-se muito lenta e o processo é dado por finalizado. Este limite inferior é conhecido como teor de umidade de equilíbrio ( $M_e$ ) e ocorre quando o grão em processo de secagem está em equilíbrio higroscópico com o vapor do ar de secagem (FIG. 2.11a). Neste momento a umidade do grão está no nível de saturação do ar, a pressão do vapor na superfície do grão e a pressão parcial do vapor no ar se equilibram e o ar perde o seu poder de retirada de água (BORTOLAIA, 2011; SOUZA, 2013).

O valor da umidade de equilíbrio muda com a temperatura e com a umidade relativa do ar ambiente. Qualquer alteração nestas propriedades favorece o processo de secagem novamente. O conteúdo de equilíbrio depende diretamente da natureza do material a ser seco, sendo zero para materiais não porosos e maior que zero para porosos. Os poros aumentam o poder de retenção de umidade pelo material e também favorecem a adsorção e absorção de água na superfície (DINÇER e ZAMFIRESCU, 2016).

Segundo Bala (2017) o equilíbrio higroscópico depende também da variedade e maturidade do grão. Experimentos realizados por Ranjbaran *et al.* (2014) e Bala (2017) mostraram quem em baixas temperaturas (até 70°C) a umidade relativa do ar no interior de um leito de grãos varia muito pouco durante a secagem. Em geral, há uma redução na umidade de equilíbrio quando a temperatura é aumentada. Para o milho, os testes demonstraram um abaixamento de aproximadamente 3% na umidade de equilíbrio para cada 18°C aumentados na temperatura de secagem.

O teor de umidade de equilíbrio é um fator muito importante para determinação da cinética de secagem e necessário nas simulações numéricas do processo. A umidade de equilíbrio pode ser prevista por vários modelos matemáticos presentes na literatura, muitos destes já com a eficácia comprovada experimentalmente. Entretanto, a determinação experimental direta é uma forma muito útil para a prevenção de erros na simulação, uma vez que pode ser determinada uma equação mais simples e específica para o processo de secagem do grão em estudo.

As curvas experimentais são obtidas realizando a secagem (dessorção) dos grãos em condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar. O método mais utilizado é o de determinação direta, onde a massa de uma porção de grãos é medida ao longo do tempo de secagem até que se observe uma variação mínima da mesma. Esta variação mínima está relacionada com o erro da balança de precisão utilizada. Em geral, a massa de água do grão é retirada por aquecimento em uma estufa (BORGES, 2016).

Correa *et al.* (2005) determinaram experimentalmente o equilíbrio higroscópico de espigas de milho, os autores utilizaram o método de secagem direta do produto em estufas de renovação de ar. Após os testes foi concluído que o teor de umidade de equilíbrio higroscópico decresce com o aumento da temperatura.

Bortolaia (2011) usou o método experimental direto para determinar o comportamento da umidade de equilíbrio durante a secagem de soja. Os dados experimentais foram usados para simular o processo de secagem, e concluiu que o uso do modelo experimental para a umidade de equilíbrio foi fundamental para obtenção de simulações mais precisas do processo.

Smaniotto *et al.* (2012) estudaram o fenômeno de dessorção para uma variedade específica de grãos de milho. O teor de equilíbrio foi determinado realizando a secagem dos grãos em estufa com ventilação forçada. Os autores concluíram que o teor de equilíbrio higroscópico diminui proporcionalmente com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Estudos de adsorção e dessorção na secagem da soja usando sílica gel como agente para controle de umidade do ar, foram obtidas por Souza (2013). Neste estudo, as amostras foram pesadas sucessivamente após a secagem em estufa com controle das condições internas. Após os resultados uma equação obtida experimentalmente foi usada para estimar o conteúdo de umidade da soja em camada espessa.

Glass *et al.* (2018) realizaram medidas experimentais de adsorção e dessorção de umidade em diversos materiais celulósicos (madeira e papel) em uma temperatura fixa e diferentes umidades relativas do ar. Os autores concluíram que mudanças na umidade relativa, nos intervalos entre 50-60% e 70-80%, provocam mudanças pouco significativas na umidade de equilíbrio nas condições testadas.

Tejada-Ortigoza *et al.* (2020) usaram o método direto para medir a umidade de equilíbrio de alimentos (mandioca, banana e maçã). Os autores concluíram que os dados experimentais obtidos em 24 horas podem ser usados para a proposição de um modelo matemático de adsorção e dessorção de umidade.

Portanto, a determinação experimental do equilíbrio higroscópico de um produto específico é uma etapa muito importante para os trabalhos de simulação do processo de secagem, pois uma equação matemática que representa o fenômeno com fidelidade possibilita uma menor probabilidade de erro durante e após a execução do modelo.

### 2.2.3 Modelos de secagem em camada delgada

A taxa de ocorrência dos fenômenos físicos durante o processo de secagem de grãos, a priori, está principalmente relacionada aos mecanismos nos quais a massa e o calor são transferidos entre o ar quente da secagem e uma camada delgada de grãos úmidos. Em uma camada delgada o material apresenta a superfície de exposição de grãos maximizada em relação ao fluxo de ar, de tal forma que as condições de pressão, fluxo, temperatura e umidade relativa, do ar de secagem, permanecem constantes ao passar através da camada de grãos (CHEN e WU, 2001). As equações matemáticas que representam a secagem em camada delgada são conhecidas como modelos de camada delgada.

Segundo Bortolaia (2011), nos modelos de camada delgada, os teores de umidade e temperaturas do ar e do grão, em todo o volume de controle, são uniformes a cada intervalo de tempo. O estudo experimental da secagem em camada delgada é necessário para obter as constantes das equações empíricas que representam o comportamento da secagem. Entretanto, as condições do ar de exaustão podem ser medidas ao longo do tempo no ensaio de secagem, pois estas podem contribuir para um controle mais efetivo do processo e melhores resultados para a validação de modelos (ALONSO, 2011).

Durante o teste na camada delgada a massa da amostra em análise deve ser medida e registrada periodicamente. Desta maneira é obtida a variação do teor de umidade da camada com o tempo, cujo gráfico resultante expõe a curva de secagem específica do produto, como mostra o FIG. 2.11a.

A determinação experimental da taxa de secagem permitiu que vários pesquisadores desenvolvessem modelos matemáticos representativos para a camada delgada. Reporta-se que o primeiro deles foi elaborado por Lewis (1921), em seguida outros autores desenvolveram novos modelos visando melhoramentos e adaptações ao produto desejado, como nos modelos de Page (1949), Thompson (1968), Overhults *et al.* (1973), Hukill (1974) e Brooker *et al.* (1981). Nos últimos anos muitos trabalhos foram publicados com a utilização de modelos cinéticos ajustados. Midilli *et al.* (2002) propuseram um novo modelo baseado nos anteriores. Bortolaia (2011) usou os modelos para prever o comportamento de soja em secador de fluxo contínuo. Rocha (2012) aplicou as equações no processo de resfriamento de grãos em silos. Kucuk *et al.* (2014) listaram a aplicabilidade dos vários modelos conhecidos e Borges (2016) simulou o modelo de difusão de secagem em camada fina usando diversos *softwares*.

Algumas equações foram concebidas de forma puramente teórica, partindo de hipóteses que permitissem a simplificação do tratamento matemático. Outras foram obtidas de forma semiempírica ou empírica com os coeficientes de correção obtidos experimentalmente (ALONSO, 2011; BORTOLAIA 2011)

Os modelos puramente teóricos têm sua proposição dada pela distribuição de calor e massa no interior do grão. Uma série de equações diferenciais parciais são utilizadas para descrever o modelo, e foram apresentadas por Luikov (1975). Entretanto, estes não se tornaram muito populares devido ao grau de complexidade e controle de variáveis necessários (SOUZA, 2013). Uma descrição detalhada destes modelos pode ser encontrada em Bortolaia (2011). As equações semiempíricas são baseadas na Lei de resfriamento de Newton, e são conhecidas como modelos exponenciais. Nestes são aplicados os conceitos de transferência de massa e secagem isotérmica. Já os modelos empíricos negligenciam a resistência à transferência de massa e calor, e são obtidos por relações diretas entre o teor de umidade e o tempo de secagem por meio de ajuste de curvas experimentais (BORTOLIA, 2011; DINÇER E ZAMFIRESCU, 2016).

Neste trabalho foram utilizadas as equações semiempíricas e empíricas para camada delgada descritas no QUADRO 2.1 a seguir.

QUADRO 2.1 – Equações da cinética da secagem referentes aos modelos de secagem mais comuns

EQUAÇÃO	REFERÊNCIA	Nº
$MR = \exp(-kt)$ , com $k = a \exp\left(-\frac{b}{T_f}\right)$	Lewis (1921) Souza (2013) Khanchi e Birrell (2017)	(2.6)
$MR = \exp(-kt^n)$ , com $k = a \exp\left(-\frac{b}{T_f}\right)$	Page (1949) Souza (2013) Le-xiu <i>et al.</i> (2016)	(2.7)
$MR = \left(\frac{-a - (a^2 + 4bt)^{0,5}}{2b}\right)$	Thompson (1968) Dantas <i>et al.</i> (2011)	(2.8)
$MR = \exp((-kt)^n)$ , com $k = \exp\left(a + \frac{b}{T_f}\right)$	Overhults <i>et al</i> (1973) Souza (2013)	(2.9)
$MR = c \exp(-kt)$ , com $k = a \exp\left(-\frac{b}{T_f}\right)$	Brooker <i>et al</i> (1981) Souza (2013) Doymaz (2017)	(2.10)
$MR = c \exp(-kt^n) + dt$ , com $k = a + b \ln T_f$	Midilli <i>et al.</i> (2002) Doymaz (2017)	(2.11)

Observa-se que em todas as equações aparecem coeficientes ( $a, b, c, d$ ) e a constante de secagem ( $k$ ), que são parâmetros que dependem do tipo de grão, da temperatura do ar e do ambiente de secagem. Estas foram escolhidas após pesquisa bibliográfica sobre os modelos de camada delgada mais usados na secagem, principalmente de grãos. Tais modelos mostraram melhores ajustes aos dados obtidos experimentalmente. Alguns dos trabalhos pesquisados são comentados a seguir.

Em Borges (2002) um modelo de camada fina com aproximações por polinômios de segundo grau foi usado para simular a secagem da soja em camada espessa. Foram usados dados experimentais para ajustar uma equação totalmente empírica e proposta para um intervalo de temperaturas de 60 a 110°C e velocidade de secagem 0,5 a 3 m/s. Apesar do modelo ser considerado adequado para descrever a secagem da soja, o mesmo sugere melhorias devido ao grau de discordâncias em diferentes velocidades de secagem. Ainda no mesmo período, Souza *et al.* (2002) usaram a equação do modelo de Thompson (1968) para a secagem de milho proveniente do Paraná. Parte do processo de secagem foi desenvolvido com os grãos ainda nas espigas, e apesar do modelo implementado apresentar respostas consideradas satisfatórias o erro relativo médio foi de 10,88%. O autor sugere mais estudos para a obtenção de novos valores para as constantes da equação do modelo proposto.

Vitorino (2009) estudou e modelou a cinética de secagem em camadas delgadas de um híbrido específico de milho aplicando-se seis modelos tradicionalmente usados para tal finalidade (dois termos, exponencial, Henderson, Midilli, Page e Newton). Todos os modelos foram ajustados experimentalmente e apresentaram resultados satisfatórios. Os experimentos foram realizados em estufa fechada com circulação de ar. Nestas condições os modelos apresentaram coeficiente de dispersão médio de 0,99 para temperaturas de 40 a 70°C. Entretanto, houve a necessidade de modificação nos parâmetros das equações para cada temperatura analisada. Um erro médio de 4,8% foi obtido no uso dos modelos de camada delgada para acoplar as equações da camada espessa.

Hemis *et al.* (2011a) usaram as equações de Midilli e Page para modelar a cinética da secagem em camada delgada de grãos de trigo em micro-ondas. Os modelos foram analisados em três potências distintas do equipamento. Após o ajuste dos parâmetros e acoplamentos foi realizada a modelagem. Os resultados obtidos por simulação foram piores para potências do equipamento muito baixas e muito elevadas, e satisfatórios para potências intermediárias.

Um programa computacional foi desenvolvido por Dantas *et al.* (2011) para simular a secagem de grãos de milho de forma genérica. O programa permite adicionar parâmetros determinados experimentalmente para o modelo de camada delgada de Thompson, além da umidade de equilíbrio, calor latente e razão de conversão. A grande vantagem deste programa é a possibilidade de configurar um conjunto de parâmetros necessários à simulação.

O processo de secagem da soja foi estudado por Bortolaia (2011) em camada delgada e espessa para um secador tipo torre de fluxo contínuo. Durante seu trabalho foi desenvolvido um modelo para camada delgada que considera o grão constituído por dois compartimentos, e assim duas equações diferenciais para a cinética da secagem. A equação da camada delgada foi usada para acoplar um sistema de quatro equações diferenciais que descreveram a secagem em camada espessa. O modelo foi testado para temperatura do ar de secagem de 45 a 110°C e velocidade do ar de 0 a 2,5 m/s. As simulações unidimensionais foram comparadas com os dados experimentais, diferenças relativas médias pouco menores que 7% foram obtidas, validando assim o modelo proposto. Khatchatourian (2012) utilizou o mesmo modelo de camada delgada para estudar a influência da velocidade e umidade relativa do ar na secagem de soja. Foi observado que para umidades iniciais elevadas do grão aumentos na velocidade do ar aceleravam o processo de secagem. Entretanto, para grãos de baixa umidade inicial a influência da velocidade era praticamente nula. O modelo foi simulado e mostrou concordância satisfatória com os dados experimentais.

Em Souza (2013) a secagem da soja foi estudada em leito fixo com uso da sílica gel como agente desumidificador do ar de secagem. A taxa da secagem em camada delgada foi obtida por ajustes de diversos modelos matemáticos, e as equações de Copace e de Overhults foram consideradas as mais adequadas para representar o fenômeno. As equações para secagem em camada espessa foram acopladas e modeladas matematicamente, as respostas simuladas comparadas com os valores experimentais mostraram uma boa concordância, com desvios médios variando de 1,4 a 5,7% e teores de umidade do grão entre 13 e 14% (bs) foram obtidos.

Khanchi *et al.* (2013) usaram dois modelos exponenciais (Lewis e Page) para avaliar a secagem em camada delgada de um tipo de gramínea. O modelo avaliou a influência da radiação como única fonte de calor para a secagem da planta no campo. Os dados simulados foram ajustados com os experimentos para obtenção dos parâmetros da equação, mostrando um coeficiente de correlação de 0,96.

Um modelo para a camada delgada tendo como base medidas de potencial da água foi proposto por Liu *et al.* (2015) para a secagem do milho. A equação utiliza parâmetros relacionados a migração da água por osmose, medida em termos do coeficiente de atividade da água. Os testes foram realizados em seis camadas consecutivas na vertical e os valores simulados apresentaram erros relativos máximos próximos de 3%.

O modelo de Midilli para camada delgada foi testado por Nejadi e Nikbakht (2016) para estudar a secagem do milho em leite fluidizado com aquecimento por irradiação infravermelha. O modelo foi simulado e os resultados mostraram desvios entre 7 e 11% para o teor de umidade do grão. Borges (2016) realizou estudos usando as soluções analítica e numérica da equação de difusão para descrever a secagem em camada fina de grãos de milho nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C. Ele considerou os grãos na forma aproximada de um paralelepípedo e realizou a simulação tridimensional em coordenadas cartesianas. O mesmo comparou os dados simulados com aqueles obtidos pela equação de Page para a camada delgada e também com dados experimentais. Segundo o autor os resultados foram consistentes e o modelo validado. O milho também foi objeto de estudo no trabalho de Le-xiu *et al.* (2016). Eles estudaram a variação dos coeficientes das equações empíricas de Page e Brokker *et al.* para 30 linhagens de milho distintas. Ambas as equações apresentaram uma boa correlação com os dados experimentais. Eles concluíram que os coeficientes foram significativamente influenciados pela textura dos grãos (endosperma vítreo ou farináceo). Esta descoberta pode ser usada para auxiliar as pesquisas no ajuste de constantes empíricas de cinética da secagem para o milho com diferentes texturas e traços fenotípicos.

A secagem de produtos no campo foi estudada por Khanchi e Birrell (2017), os quais analisaram a aplicação do modelo exponencial de Lewis de camada delgada em palha de milho, gramíneas e plantas para silagem. A constante da equação foi determinada para diferentes períodos de secagem ao longo do dia e dos meses do ano. Os resultados foram satisfatórios e o modelo é útil para o planejamento de operações de logística e transporte em campo para fornecimento de biomassa.

Um novo modelo de secagem em camada delgada foi desenvolvido por Jiang *et al.* (2017) tendo micro-ondas como fonte de calor e batatas como produto a ser seco. Neste modelo, a difusão da umidade líquida ao longo da camada de material foi ignorada devido à rápida vaporização sob energia intensiva de micro-ondas. O modelo foi então resolvido numericamente e validado por meio da comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais de umidade. Os resultados indicaram a obtenção de uma boa concordância baseada na correlação de 0,9695, o que demonstrou sua viabilidade.

Cinco modelos de camada delgada foram investigados por Doymaz (2017) para a secagem de fatias de cenoura. Dentre estes o modelo de Midilli foi o que melhor caracterizou o estudo da cinética nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e uma velocidade constante de 2 m/s. Os dados experimentais foram coletados durante a secagem do produto em secador de cabine.

A secagem de cultivares de arroz de grãos longos foi analisada por Prakash e Siebenmorgen (2018) usando os modelos de Page, Newton e Midilli. Inicialmente foi analisado apenas um cultivar e os resultados mostraram que o modelo de Page descreveu os dados experimentais de secagem com muita precisão, e com erros quadráticos médios da ordem de 1,5%. Posteriormente os mesmos modelos foram testados para cinco outros cultivares de arroz e apresentaram erros de até 3,5%. Os modelos foram considerados validados pelos autores e podem ser ajustados também para a secagem de grãos de arroz médios e curtos.

É preciso considerar que os modelos de cinética da secagem em camada delgada são simplificados, não sendo consideradas as coordenadas espaciais, desta forma estas equações não descrevem isoladamente o processo de secagem em camadas espessas como um todo. Entretanto, estes modelos são essenciais para o acoplamento adequado das equações diferenciais parciais de transferência de calor e massa que modelam a operação de secagem em sua plenitude. Desta forma, um modelo preciso de camada delgada pode ser a base para um modelo de camada espessa consistente.

#### 2.2.4 Modelos de camada espessa

Os modelos de camada espessa são definidos como aqueles que consideram as variações tanto temporais quanto espaciais para uma variável, seja do ar de secagem ou do produto a ser seco. Desta forma estes modelos representam o processo de secagem de forma mais completa, desde um grau de complexidade mais simples, como unidimensional, até os modelos tridimensionais mais complexos. A umidade é transportada por fenômenos difusivos e convectivos durante a secagem. Entretanto, em secadores de grãos com insuflação de ar quente a contribuição convectiva é dominante, devido às considerações de volume de controle na solução das equações matemáticas dos modelos, sendo desconsiderados os fenômenos difusivos (BORTOLAIA, 2011).

Muitos autores classificam os modelos de camada espessa em três tipos distintos, estes caracterizam-se por representar a secagem por equações baseadas no balanço de energia e massa, empíricas, semiempíricas e diferenciais parciais. Entretanto, para aplicação desses modelos deve-se dividir a camada espessa de produto a ser seco em diversas seções iguais e superpostas de espessura fina, de forma que as condições do ar de saída de uma camada mais

abaixo sejam iguais às condições de entrada da camada mais acima. (MATA *et al.*, 1999; MIDILLI, *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2002; BORTOLAIA, 2011; KHANCH *et al.*, 2013; KUCUK *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2015). A FIG. 2.12 mostra a representação da camada delgada a partir de uma espessa. As classificações mais comuns são descritas.

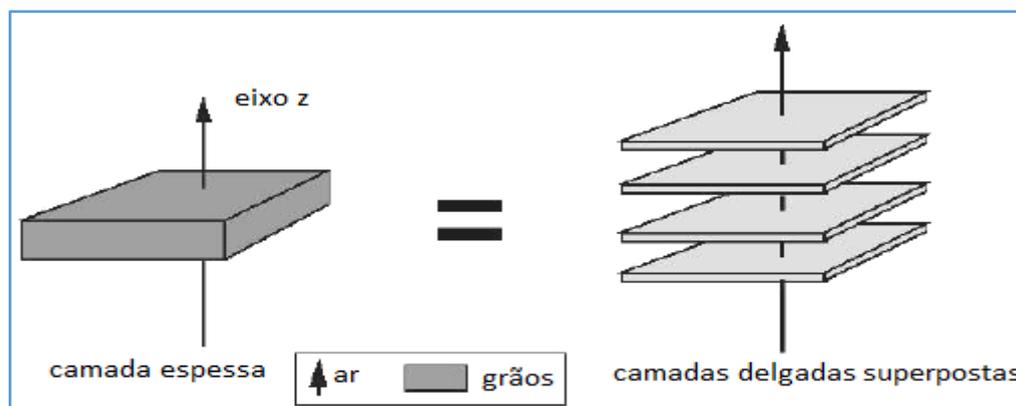


FIGURA 2.12 – Decomposição da camada espessa em camadas delgadas

FONTE: Bortolaia, 2011, p. 28.

Parry (1985) classificou os modelos de camada espessa nos tipos: modelos de equações logarítmicas e exponenciais, modelos de balanço de massa e energia e modelos de equações diferenciais parciais.

Boily e Bern (1985 apud SOUZA, 2013) usaram uma classificação mais simples para os modelos em camada espessa: semiteóricos, com solução baseada na equação da difusão e modelos empíricos, estes baseados na solução da equação de Page para a camada delgada.

Brooker *et al.* (1992) utilizaram uma classificação muito parecida com a de Parry (1985) sendo os seguintes tipos: modelos simplificados de camada espessa, modelos de na camada estacionária e modelos baseados em equações diferenciais parciais. Os primeiros apresentam soluções similares aos modelos exponenciais, enquanto o segundo tipo usa conceitos de difusão e balanço de massa e energia, enquanto os últimos são os próprios modelos de equações diferenciais classificados por Parry (1985).

Courtois (1991 apud SOUZA, 2013) dividiu os modelos de secagem em três tipos: modelos difusivos, modelos termodinâmicos de processos irreversíveis e modelos pseudofísicos. Nos modelos difusivos o produto é considerado uma esfera ou um cilindro com soluções dadas por séries infinitas ou diferenças finitas. Os termodinâmicos permitem comparação entre diferentes fluxos e com poucas simplificações torna-o um modelo difusivo-convectivo simples, entretanto, são mais aplicados para materiais como areia, ao invés de grãos. Os modelos pseudofísicos utilizam a teoria de divisão do material a ser seco em compartimentos e tem a vantagem de necessitar de poucos recursos computacionais.

A classificação de Parry (1985) é a mais utilizada nos trabalhos de secagem, pois foi a base para desenvolvimento das outras classificações, e coincide com a classificação de Brooker (1992). Esta classificação será descrita em maiores detalhes nos itens seguintes.

#### 2.2.4.1 O modelo logarítmico e exponencial – Hukill

O modelo logarítmico e exponencial foi demonstrado por Hukill (PARRY, 1985; BORGES, 2002; BORTOLAIA, 2011). Ele assumiu que a variação temporal do teor de umidade do produto é proporcional à variação espacial unidimensional da temperatura do ar de secagem. Este modelo permite determinar o teor de umidade para determinada altura de camada de grãos e admite que a temperatura do ar decresce exponencialmente à medida que o ar vai passando pela massa de grãos.

Embora o modelo não considere o aquecimento dos grãos pelo ar de secagem, ele apresenta-se como uma ferramenta muito útil para simulação de secagem. A condição inicial e de contorno utilizam equações na forma exponencial para a temperatura do ar e teor de umidade no grão, com coeficientes obtidos por modelos empíricos. Este modelo de Hukill assume que a energia perdida pelo ar de secagem é devida somente ao calor necessário para evaporação da água e despreza a energia devido ao aquecimento do grão. A solução proposta por Hukill fornece uma equação para a razão de umidade na forma de expoentes, sendo estes dados por variáveis de espaço e tempo. As limitações no modelo foram observadas pelo próprio autor, ele afirmou que a equação subestimava o tempo requerido para a secagem do grão (PARRY, 1985; BORTOLAIA, 2011).

Melhorias no modelo de Hukill foram propostas por Baughman *et al.* (1971 apud BORTOLAIA, 2011) e Wang *et al.* (2004), sendo utilizadas equações exponenciais e logaritmos para os termos temporais e espaciais. Estas equações tentavam modelar o avanço da zona de secagem ao longo da espessura da camada de grãos.

As equações que descrevem o modelo de Hukill, bem como as melhorias citadas podem ser encontradas no APENDICE F. Os modelos logarítmicos e exponenciais são restritos a temperaturas e velocidade do ar de secagem baixas (BORTOLAIA, 2011).

#### 2.2.4.2 O modelo de balanço de massa e energia – Thompson

Nos modelos de balanço de massa e energia as condições de equilíbrio são atingidas pelo ar de secagem e pelos grãos em cada volume de controle escolhido, para cada intervalo de tempo.

Um modelo com estas características foi desenvolvido por Boyce (1966 apud BORTOLAIA, 2011) e aprimorado por Thompson (1968) durante a secagem de grãos de milho. Ele propôs alterações visando ajustar os valores de temperatura e umidade do ar. Para tanto foram usadas equações para calcular os teores de umidade de equilíbrio, o calor latente de vaporização da água, o calor específico do milho e uma equação empírica de camada delgada para a secagem dos grãos. O modelo de Thompson para camada espessa utiliza as leis de transferência de energia e massa e apresenta simplificações que o torna versátil e reduz o tempo de simulação, tornando-o bastante utilizado tal como em Souza *et al.* (2002).

Algumas equações deste modelo podem ser encontradas no APÊNDICE F. Para desenvolvimento do modelo as seguintes suposições foram consideradas por Thompson (1968):

- a) A secagem de uma camada delgada de produto pode ser descrita por uma equação empírica.
- b) A temperatura do grão é igual a temperatura do ar que o envolve.
- c) O teor de água de equilíbrio do milho depende da temperatura e umidade relativa do ar nas vizinhanças do grão.
- d) A entalpia de vaporização da água presente no grão depende da temperatura e do teor de umidade do milho.
- e) A entalpia específica do milho depende do teor de água presente no mesmo.

Os modelos de balanço de energia e massa têm sido aplicados em pesquisas de secagem com resultados satisfatórios, porém, a precisão dos mesmos é dependente das hipóteses feitas na simplificação durante a derivação do modelo.

#### 2.2.4.3 O modelo de equações diferenciais parciais – Brooker - *Michigan*

Os modelos compostos por equações diferenciais parciais são mais exatos do que os logarítmicos e de balanço de energia e massa, porém exigem um tempo de simulação maior. Estes modelos são baseados nos fenômenos de transferência de calor e massa com menos restrições simplificadoras, e assim representando uma maior plenitude do processo de secagem. A viabilidade destes modelos está relacionada ao uso de computadores com maior capacidade de memória e velocidade de processamento.

Um modelo baseado em equações diferenciais bastante utilizado em trabalhos de secagem foi proposto por Brooker *et al.* (1992), e aplicável a silos e secadores de leito fixo com colunas para bateladas de grãos. O modelo é conhecido como termodinâmica da mistura em duas fases e formulado com base no balanço de energia e de massa através da análise das trocas num volume diferencial (FIG. 2.13), localizado arbitrariamente no leito fixo de grãos a serem secos. Uma fase sólida e outra gasosa caracteriza este modelo, sendo que em cada ponto do sistema são analisadas a velocidade, temperatura e umidade. O equacionamento do modelo de Brooker *et al.* (1992) também foi proposto por outros autores, tais como Bakker-Arkema *et al.* (1967 apud BORTOLAIA, 2011), Brooker *et al.* (1981) e Ingram (1976, apud SOUZA, 2013). Este modelo também recebeu o nome particular de modelo de *Michigan State University* (MSU). Apesar de serem desenvolvidas a mais de quarenta anos, as equações do modelo de Brooker *et al.* (1981, 1992) ainda servem como base para os estudos de simulação da secagem de produtos agrícolas, permitindo descrever as condições de energia e umidade a partir de quatro equações diferenciais parciais.

O desenvolvimento deste trabalho de tese usou como base as equações do modelo MSU, para sua representação foi considerado um volume de controle ( $A.dy$ ) e um sistema contendo quatro variáveis a serem solucionadas.

➤ Para o grão a ser seco:

- Teor de umidade em base seca -  $M_s$
- Temperatura -  $T_{grão}$

➤ Para o ar de secagem:

- Umidade absoluta -  $W$
- Temperatura -  $T_{ar}$

Na FIG. 2.13 é apresentado um esquema constituído por um volume de controle mostrando a variação das grandezas associadas ao processo ao longo de uma camada que compõem o leito de grãos. Quando o ar quente passa através do volume de controle durante um intervalo de tempo, parte da água presente no grão é evaporada devido a transferência de calor ar-grão, em consequência o teor de umidade do grão diminui enquanto sua temperatura aumenta, em compensação a umidade absoluta do ar de secagem aumenta enquanto sua temperatura diminui. O ar de secagem arrasta o vapor de água da camada anteriormente seca, e ao entrar em uma outra posterior terá seu potencial de secagem reduzido em relação ao inicial.

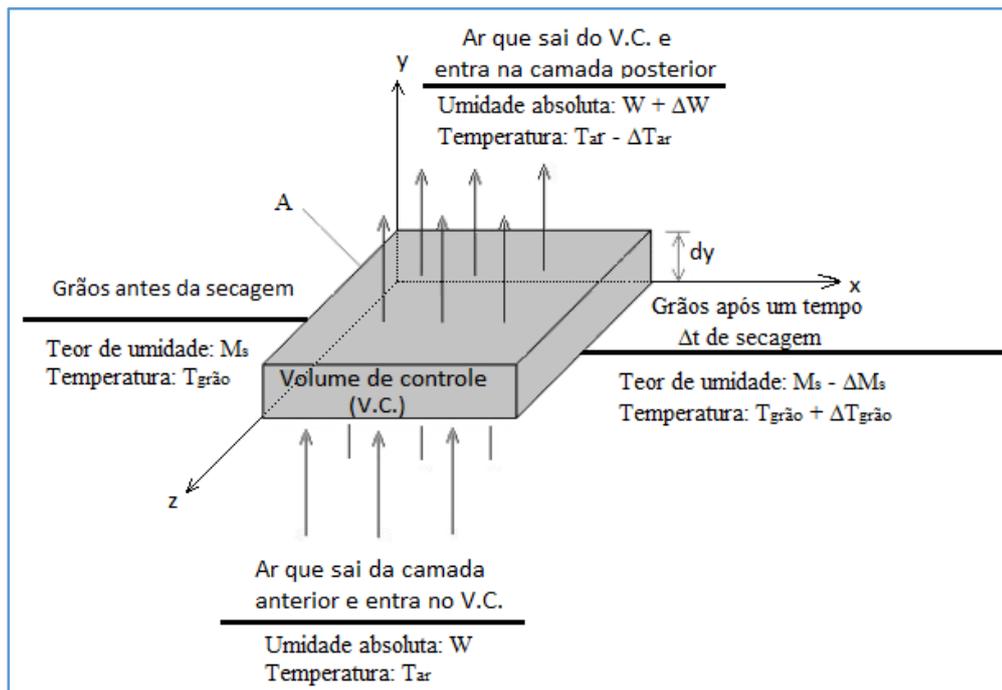


FIGURA 2.13 - Esquema para as variáveis de secagem em um volume de controle.

FONTE: Próprio autor

Para o desenvolvimento do modelo MSU, Brooker sugeriu as seguintes suposições (BROOKER *et al.*, 1992; BORTOLAIA, 2011, SOUZA, 2013):

- a) A contração volumétrica dos grãos durante a secagem é desprezível (a porosidade do leito é constante);
- b) O gradiente de temperatura dentro dos grãos, individualmente, é desprezível;
- c) A condução de calor devido ao contato entre os grãos é desprezível;
- d) O fluxo de ar durante a secagem é constante;
- e) A célula de secagem é considerada adiabática, com capacidade térmica desprezível;
- f) Os calores específicos do ar e dos grãos são considerados constantes durante um curto intervalo de tempo de secagem.
- g) Uma equação para a cinética da secagem dos grãos em camada delgada é conhecida e representa a taxa de variação do teor de umidade do grão com precisão suficiente;
- h) Uma equação para o equilíbrio higroscópico grão-ar é conhecida e representa os fenômenos com precisão suficiente;
- i) A evaporação da água nos grãos ocorre na temperatura de secagem;
- j) A transferência de calor é dominada por processos convectivos do ar de secagem;
- k) A compactação dos grãos em cada volume de controle em análise é considerada uniforme.

Com base nas suposições apresentadas são realizados os balanços de energia e massa para o ar e o grão, visando a obtenção das equações diferenciais parciais que modelam o processo de secagem. Os balanços e as equações são mostrados no APÊNDICE F para um plano unidimensional, a adequação do mesmo ao nível bi e tridimensional, bem como coordenadas cilíndricas é mostrado no capítulo 3.

A solução do problema da secagem de produtos em camada espessa usando o modelo MSU, demanda a necessidade de acoplamento de um conjunto de equações diferenciais parciais, podendo ser utilizadas coordenadas cartesianas, cilíndricas ou esféricas em uma, duas ou três dimensões. Para solucionar o modelo matemático as condições iniciais e de contorno devem ser conhecidas. Estas podem ser dadas pelas temperaturas iniciais do ar e do grão, teor de umidade inicial do grão e umidade absoluta inicial do ar de secagem. As soluções numéricas são obtidas com o auxílio de ferramentas computacionais.

#### 2.2.4.4 Pesquisas utilizando os modelos de camada espessa

Muitos trabalhos de pesquisa foram publicados nos últimos anos utilizando as equações dos modelos de camada espessa. Muitas destas equações foram melhoradas e outros modelos foram propostos partindo das teorias citadas anteriormente. Alguns destes trabalhos são apresentados nesta seção.

Zare e Chen (2009) utilizaram um modelo de equações diferenciais parciais, de camada espessa, baseados em Brooker *et al.* (1992) para simular a secagem de arroz. Os perfis de umidade do grão, temperatura do grão, temperatura do ar e umidade do ar foram obtidos durante o processo de secagem. Para avaliar a validade deste modelo experimentos foram realizados em secador laboratorial de leito fixo. Os experimentos foram realizados em dois níveis de temperatura e três de vazão do ar. Para resolver numericamente as equações acopladas foi usado o método das diferenças finitas. Boa concordância foi encontrada entre os resultados da simulação e os dados experimentais. Após a validação do modelo foi encontrado a condição ótima de secagem.

O modelo de balanço de massa e energia proposto por Thompson foi utilizado por Vitorino (2009) para simular a secagem de milho em leito fixo vertical. O programa foi validado com dados experimentais coletados em secador comercial e apresentou um erro absoluto médio de 4,8%, com coeficiente de correlação de 0,92. O modelo foi considerado satisfatório para a secagem da variedade de milho utilizada.

Lecorvaisier *et al.* (2010) utilizaram um modelo teórico para simular a secagem de produtos agrícolas considerando a transferência de calor e massa, também foram levados em consideração aspectos de turbulência e difusividade. As equações foram resolvidas em geometria 2D usando o método de diferenças finitas. Os resultados das simulações numéricas foram comparados com dados numéricos anteriores validados com o modelo empírico de Thompson. Os resultados apontaram a influência de vários parâmetros na eficiência do sistema de secagem, sendo necessário proceder a um levantamento experimental da turbulência afim de validar as expressões teóricas.

Hemis *et al.* (2011b) propuseram um modelo similar ao desenvolvido por Brooker (1992), ou seja, quatro equações diferenciais parciais foram acopladas e solucionadas usando o método numérico de diferenças finitas. A discretização temporal foi feita segundo método de Crank-Nicolson. O modelo difere daquele de *Michigan* em relação a consideração de não-equilíbrio térmico entre o ar de secagem e os grãos. O modelo matemático foi validado comparando-o com dados experimentais da secagem de trigo e cevada em leito fixo de grãos em laboratório. Os resultados da simulação unidimensional obtidos pelo modelo apresentaram concordância com os experimentais.

A secagem de arroz em camada espessa foi estudada por Harchegani *et al.* (2012) em um sistema de secagem constituído de um leito fixo de grãos. O modelo de *Michigan* modificado para sistemas de não equilíbrio térmico entre grão e ar foi proposto. O método das diferenças finitas foi utilizado para a solução numérica e implementado em um computador. O método foi capaz de calcular as temperaturas e umidades do grão e do ar de secagem em nível unidimensional. Os dados experimentais foram obtidos em secador projetado para a análise do modelo e os dados simulados mostraram uma boa concordância, sendo o erro médio relativo médio de aproximadamente 10%.

O método de elementos finitos para solução numérica de equações diferenciais parciais foi usado por Barreto *et al.* (2013) para prever a secagem de grãos de milho e soja. A validação foi realizada com a comparação com os dados experimentais, e foi observado que as respostas do modelo para a temperatura apresentaram um erro máximo de 1,7°C e de 0,69% para a umidade. A sensibilidade da solução a variações nas propriedades higroscópicas de grãos e a seleção de uma equação isotérmica de sorção foi examinada. Para um dado gradiente de temperatura, a migração de umidade foi maior na soja do que no milho e no trigo. Como resultado das propriedades higroscópicas e da permeabilidade do grão, o trigo exibiu a maior resistência à migração de umidade.

Um modelo tridimensional de equações diferenciais parciais, aplicado a um único grão durante o processo de secagem, foi estudado por Zhang *et al.* (2013). Para determinar o mecanismo de consumo de energia na secagem por ar quente, foram simulados os processos internos de transferência de calor e massa que ocorrem durante a secagem de um único grão de milho. As simulações são baseadas em um modelo sólido 3D. O modelo de corpo real em 3D é obtido pela digitalização dos grãos de milho com uma máquina de tomografia computadorizada (TC) de alta precisão. As imagens de TC são então editadas pelo *software* MIMICS e ANSYS para reconstruir o modelo tridimensional de um grão de milho. A equação de condução de calor de Fourier, a equação de difusão de Fick, o coeficiente de transferência de calor e o coeficiente de difusão de massa são escolhidos como as equações governantes do modelo seco teórico. As simulações numéricas foram executadas no *software* COMSOL Multiphysics. A temperatura do ar e velocidade nos processos de transferência de calor e massa são discutidas. Os resultados mostraram que a transferência de massa predomina durante a secagem ao ar quente dos grãos de milho.

O método de elementos finitos também foi usado por Liu *et al.* (2015) para resolver equações diferenciais parciais para a secagem de grãos de milho em camadas espessas de leito fixo. O modelo utilizou a predição da cinética da secagem a partir do potencial químico da água no interior dos grãos e fora dos mesmos. A faixa de aplicação deste método é estreita e esse método não se aplica a sistemas cuja pressão seria um fator influente, como sistema de secagem a vácuo. Este estudo estabeleceu um sistema de simulação numérica do processo de secagem do milho que se mostrou eficaz. Os resultados simulados e experimentais revelaram que a dessorção e a adsorção coexistem na secagem em leito profundo.

Um modelo de equações diferenciais parciais, similar ao usado por Brooker (1992), foi desenvolvido por Souza *et al.* (2015) para secagem de sementes de soja. Foi avaliada a transferência simultânea de calor e massa entre o ar e sementes de soja em secador de leito fixo em camada espessa, utilizando um modelo de duas fases, com um conjunto adequado de equações constitutivas. O modelo proposto foi resolvido numericamente usando o método de diferenças finitas. Os dados experimentais para umidade e temperatura da semente, e aqueles do ar de secagem, obtidos em uma unidade piloto em diferentes posições ao longo do leito, foram comparados com resultados simulados, o desvio médio nas medidas de umidade foi de 6%, indicando boa concordância. A heterogeneidade do processo ao longo do secador de leito fixo também foi analisada.

Um modelo de equações diferenciais parciais com balanço de massa e energia foi usado por Elgamal *et al.* (2017) para simular a secagem de grãos de arroz. O principal objetivo do estudo foi verificar as distribuições de umidade e temperatura ao longo do leito de arroz. Neste modelo, os coeficientes de transferência de calor e massa previstos foram utilizados para o acoplamento de quatro equações diferenciais parciais para o fenômeno ocorrendo no interior do grão de arroz. As equações foram solucionadas utilizando o método de elementos finitos implementados no ambiente de simulação *COMSOL Multiphysics®*. O modelo desenvolvido foi utilizado para prever os teores de umidade e temperaturas de grãos em diferentes alturas no leito durante o processo de secagem.

A secagem de sementes de uva foi estudada por Johann *et al.* (2018) utilizando um modelo de equações diferenciais parciais. A equação de cinética em camada delgada foi ajustada para acoplar ao sistema de secagem em camada espessa. Após a resolução do sistema de equações foi demonstrado a viabilidade do modelo proposto por meio da comparação dos resultados simulados e experimentais. Os autores encontraram um erro médio relativo de 11,47 % e concluíram que o ajuste do modelo de camada delgada ao modelo de camada espessa foi satisfatório.

### 2.2.5 Propriedades físicas

A importância do conhecimento das características físicas do produto e do ar é fundamental para o desenvolvimento de um modelo de secagem que represente com maior fidelidade o fenômeno. Entretanto, a redução no teor de água promove alterações nas propriedades físicas dos grãos. Propriedades como a área superficial, massa e calor específicos e porosidade merecem um destaque maior pois estão diretamente relacionadas ao nível de umidade presente no grão. A perda de água durante a secagem promove a diminuição da massa dos grãos e a modificação dos espaços vazios no interior do leito, desta forma alterações na massa específica, área específica e na porosidade devem ser avaliadas. Por outro lado, a retirada de água reduz a necessidade de calor para elevar a temperatura do grão, influenciando diretamente no calor específico do mesmo. (DINÇER e ZAMFIRESCU, 2016).

Zare e Chen (2009), Zhang *et al.* (2013), Ranjbaran *et al.* (2014), Liu *et al.* (2015) e Dinçer e Zamfirescu (2016) explicam que estas alterações nas propriedades físicas dos grãos por ocasião da secagem estão relacionadas diretamente ao efeito do encolhimento, e relatam que a desconsideração deste fenômeno é uma das principais fontes de erros no desenvolvimento dos modelos matemáticos para secagem de produtos agrícolas.

O calor específico dos grãos é uma propriedade física definida como a quantidade de energia necessária para elevar, de um grau de temperatura, uma unidade de massa. Zhang *et al.* (2013) e Liu *et al.* (2015) modelaram a secagem de milho utilizando uma equação linear para a dependência do calor específico do produto com o teor de umidade, os resultados simulados foram consistentes com os dados experimentais. Esta mesma equação foi utilizada com sucesso por Zare e Chen (2009) e Ranjbaran *et al.* (2014) na simulação da secagem de arroz. Bala (2017) afirma que há um consenso geral entre os pesquisadores de produtos agrícolas em que o calor específico de grãos úmidos aumenta linearmente com o teor de umidade. No trabalho de Bala (2017) encontram-se equações propostas para o comportamento do calor específico com o teor de umidade para diversos produtos agrícolas, tais como: trigo, arroz, milho dentado e soja.

A área superficial específica é definida como a área superficial do sólido por unidade de volume ou unidade de massa. A NBR 16372 (ABNT, 2015) define a área específica de um material particulado como a medida da superfície total das partículas por unidade de volume ou massa, denominadas respectivamente, área específica em volume e área específica em massa. Oliveira *et al.* (2012, 2014) utilizaram o conceito de Mohsenin (1986) para caracterizar a área específica do milho, os autores consideraram os grãos como um esferoide escaleno tri-axial.

Em Botelho *et al.* (2018) a área específica de vários grãos foi obtida por diversos métodos experimentais e teóricos, sendo que o resultado ao considerar o grão um esferoide apresentou uma maior discrepância entre os demais. Uma forma alternativa foi utilizada por Borges (2016), sendo neste trabalho o grão considerado um paralelepípedo retangular, tanto para cálculo da área específica quanto para considerações matemáticas do modelo simulado.

## 2.2.6 Métodos numéricos usados na secagem de produtos

Os processos de transferência de calor e umidade durante a secagem de materiais úmidos estão fortemente associados e muitas vezes não podem ser desacoplados. A solução para este tipo de processo complexo é normalmente obtida por métodos numéricos, já que nenhuma forma analítica pode ser encontrada (DINÇER e ZAMFIRESCU, 2016). A teoria básica inicialmente formulada por Luikov (1934) e Philip e De Vries (1957) sugere que um potencial de transferência de umidade pode ser definido como uma variável efetiva para modelagem de movimento de umidade em um leito de materiais permeáveis. Essas teorias são revisitadas por seus autores em Luikov (1975) e De Vries (1987) aprimorados para sistemas unidimensionais. Uma extensão das soluções numéricas para problemas bidimensionais foi proposta por Comini e Lewis (1976) negligenciando os efeitos da pressão.

Após os anos 2000, diversos trabalhos foram produzidos considerando representações mais complexas para os fenômenos de secagem. Alguns efeitos secundários, como a deformação do material durante a secagem e a variação local das propriedades termofísicas, são tratados em Perré e May (2001) e Perré e Turner (2002).

Hussain e Dincer (2002) escolheram um esquema numérico do tipo explícito com grade uniforme para estudar a simulação da secagem de diversos alimentos em geometria cilíndrica axissimétrica. Já em Ranjan *et al.* (2002) e Hussain e Dincer (2003) problemas bi e tridimensionais foram estudados numericamente usando o método explícito de diferenças finitas, nestes trabalhos a secagem foi estudada em coordenadas esféricas.

Durante os trabalhos desenvolvidos por Kaya *et al.* (2006, 2007, 2008a, b) um método numérico foi desenvolvido para estudar os processos de transferência de calor e umidade durante a secagem. Neste método as equações estacionárias de fluxo externo são integradas primeiro para obter o perfil de temperatura ao redor do objeto úmido. Em seguida são obtidos o fluxo de calor local e o coeficiente de transferência de calor. Com estas informações e as condições de contorno as equações de transferência de calor e umidade dependentes do tempo podem ser resolvidas. Este método foi aprimorado por Ozalp e Dincer (2010) considerando propriedades variáveis para os produtos e estimados por métodos numéricos de resíduos ponderados.

Os métodos de elementos finitos (MEF) e dos volumes finitos (MVF) são utilizados comumente em trabalhos de simulação para estudar a secagem de produtos agrícolas. O MEF foi aplicado por Zhang *et al.* (2013) utilizando o *software COMSOL Multiphysics* para simular a secagem tridimensional do milho. Os autores elaboraram o corpo do modelo baseado em um único grão e analisaram a influência da temperatura e velocidade do ar no processo de transferência de calor e massa. Ranjbaran *et al.* (2014) usaram o MVF para estimar os efeitos da temperatura do ar na entrada e da taxa de escoamento na solução das equações diferenciais parciais (EDP) que governam a secagem do arroz. Após as simulações foi observado que em temperaturas mais altas e taxa de escoamento mais baixas têm-se uma melhor eficiência do processo. Liu *et al.* (2015) estudaram a secagem unidimensional do milho em leito fixo usando o *software MATLAB* para solução das EDP's, os resultados simulados foram consistentes com os experimentos, além de prever com eficiência os fenômenos de dessorção e absorção.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e os métodos utilizados para medição das variáveis do processo. Os protótipos das colunas de secagem construídas também são mostrados. Também são descritos os procedimentos experimentais, os modelos matemáticos e equações utilizadas, os procedimentos de simulação e as variáveis dependentes do teor de umidade dos grãos.

#### 3.1 Equipamentos e metodologia experimental

Neste item são apresentados os equipamentos e os procedimentos experimentais para a construção de colunas de secagem para a camada delgada e espessa, necessários para realização do processo de secagem. Também são descritas as características do produto utilizado para a secagem, desde a colheita até o acondicionamento.

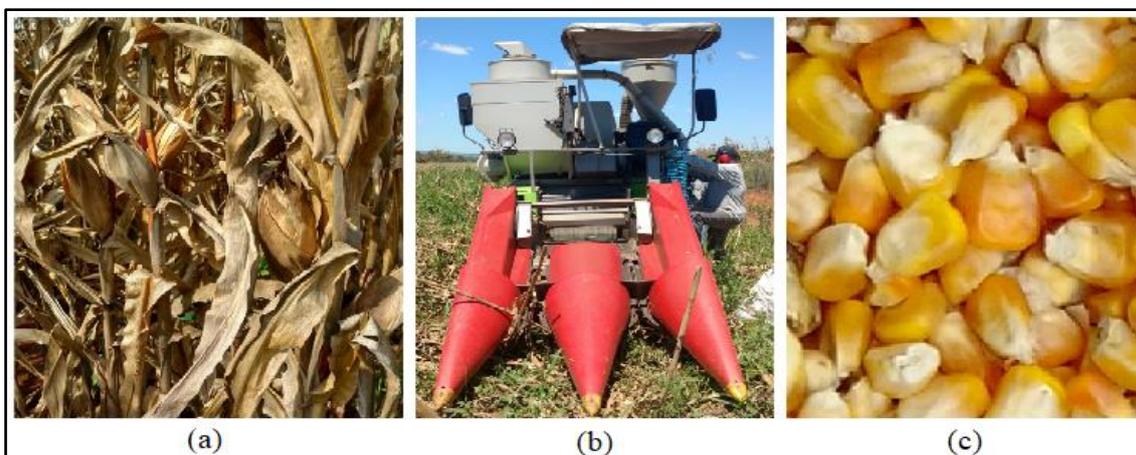
O desenvolvimento deste projeto de tese de doutorado ocorreu em parceria entre o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG (PPGMEC-UFMG), e os Departamentos de Engenharia de Materiais (DEMAT) e Engenharia Mecânica (DEM) do CEFET-MG, *campus* I e II, respectivamente, além da EMBRAPA Milho e Sorgo em Sete Lagoas - MG.

Os seguintes equipamentos foram necessários para o procedimento de secagem: secador de leito fixo com coluna de secagem intercambiável, coluna para secagem em camada delgada, coluna para secagem em camada espessa, estufa com renovação de ar, balanças digitais, termoanemômetro de fio quente, termo-higrômetro digital, termopares, transdutor de pressão, módulo de aquisição de dados e geladeira. As colunas de secagem foram construídas, já os equipamentos e o espaço físico foram disponibilizados pelo CEFET-MG.

##### 3.1.1 Produto para a secagem

Para os procedimentos experimentais foram utilizados grãos de milho do cultivar BG 7640 VYH (FIG. 3.1), que é um híbrido do tipo duro com ampla adaptação às regiões do país e sem restrição para época de cultivo, disponibilizado pela EMBRAPA Milho e Sorgo, localizada em Sete Lagoas – MG. O milho foi colhido e debulhado mecanicamente por máquina colhedora de grãos (FIG. 3.1), a planta apresentava-se no estágio ideal de maturação fisiológica, com um teor de umidade próximo a 22% em base seca ou 18% em base úmida.

FIGURA 3.1 - Milho utilizado nos procedimentos experimentais. (a) Milho in natura, (b) máquina para colheita e debulha e (c) aspecto do produto colhido



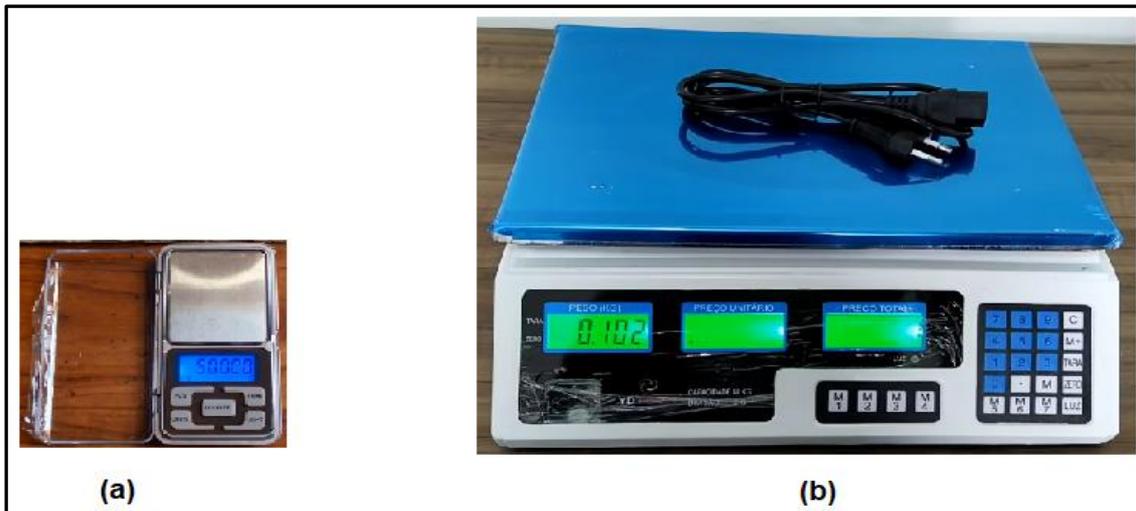
FONTE: Próprio autor

Após a colheita o milho foi transportado até o CEFET-MG e dividido em sacos plásticos impermeáveis. Cada volume foi armazenado em dois sacos vedados manualmente, tendo o cuidado de retirar o máximo possível o ar no interior de cada volume. Os sacos com o produto foram mantidos em ambiente refrigerado a 5°C, como sugerido por Borges (2016), para conservar o teor de umidade até o momento da secagem.

### 3.1.2 Equipamentos de medição

Durante os experimentos de secagem em camada delgada e espessa, diversos equipamentos de uso comum foram utilizados. As massas das amostras foram analisadas utilizando duas balanças digitais de capacidades distintas. Para análises de massas menores utilizou-se uma mini-balança digital (FIG. 3.2a) com resolução de 0,1 g e capacidade máxima de 500 g, marca PDO e modelo MH-Series Pocket Scale. Para medidas de massas maiores foi utilizada uma balança digital (FIG. 3.2b) com resolução de 2g e capacidade máxima de 40 kg, marca YDTECH e modelo 81489-A. As medidas foram realizadas em superfície plana e após o nivelamento do equipamento. Foi realizado uma verificação por comparação de massas entre as balanças utilizadas e uma balança semi-analítica de laboratório, sendo que não houve variação significativa nas medições realizadas.

FIGURA 3.2 - Balanças digitais adquiridas para realização dos procedimentos experimentais. (a) menor capacidade e (b) maior capacidade.



FONTE: Próprio autor.

Os teores de umidade das amostras de milho foram determinados com o uso de uma estufa de renovação de ar (FIG 3.3), com capacidade de 40 litros da marca Nova Técnica, com ajuste da temperatura desejada por termostato.

FIGURA 3.3 - Estufa do laboratório de secagem do CEFET-MG utilizada nos testes do teor de umidade.



FONTE: Próprio autor.

Para a medida da velocidade do ar de secagem foi utilizado um termo-anemômetro de fio quente (FIG 3.4), capaz de realizar medidas de velocidade, temperatura e fluxo volumétrico do ar. O equipamento é da marca TESTO modelo 405i, e apresenta certificado de calibração do próprio fabricante disponível no APÊNDICE A. A faixa de medição de temperatura é de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$  com resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , a faixa de medição de velocidade vai de 0 a  $30\text{ m s}^{-1}$  com resolução de  $0,01\text{ m s}^{-1}$ .

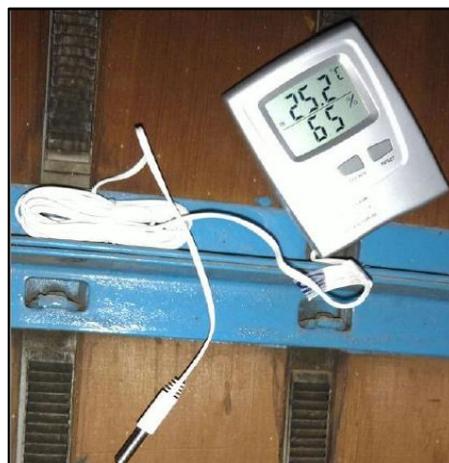
FIGURA 3.4 - Termo-anemômetro de fio quente do laboratório de energia do CEFET-MG utilizado nas medidas de velocidade do ar de secagem.



FONTE: Próprio autor

As medições de umidade relativa do ar foram realizadas com um termo-higrômetro digital (FIG. 3.5) marca INCOTERM, modelo 7666.02.0.00. O equipamento permite fazer medições de umidade relativa na faixa de medição de 15 a 95% com uma resolução de 1%. O mesmo também fornece medidas de temperatura na faixa de medição de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$  com uma resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Para uma melhor representatividade das medidas o equipamento foi calibrado em empresa especializada e o certificado de calibração pode ser encontrado no APÊNDICE A.

FIGURA 3.5 - Termo-higrômetro digital adquirido para medições de umidade relativa do ar.



FONTE: DIAS, 2019, p. 76.

As temperaturas do milho em diferentes pontos no interior do secador e a temperatura do ar de secagem na entrada, foram monitoradas por termopares tipo J de haste inox de 100 milímetros (FIG. 3.6), e um tipo T. Os termopares foram disponibilizados pelo CEFET-MG já calibrados. Os detalhes do procedimento de calibração podem ser encontrados em Dias (2019).

FIGURA 3.6 – Termopar tipo J com haste de 100 mm



FONTE: DIAS, 2019, p. 77.

As medidas de pressão do ar de secagem na entrada do secador foram realizadas com um transdutor de pressão (FIG.3.7) da marca HUBA CONTROL, modelo 694 com faixa de medição de 0 a 5 mbar. O equipamento foi calibrado em empresa especializada e o certificado de calibração encontra-se no APÊNDICE A.

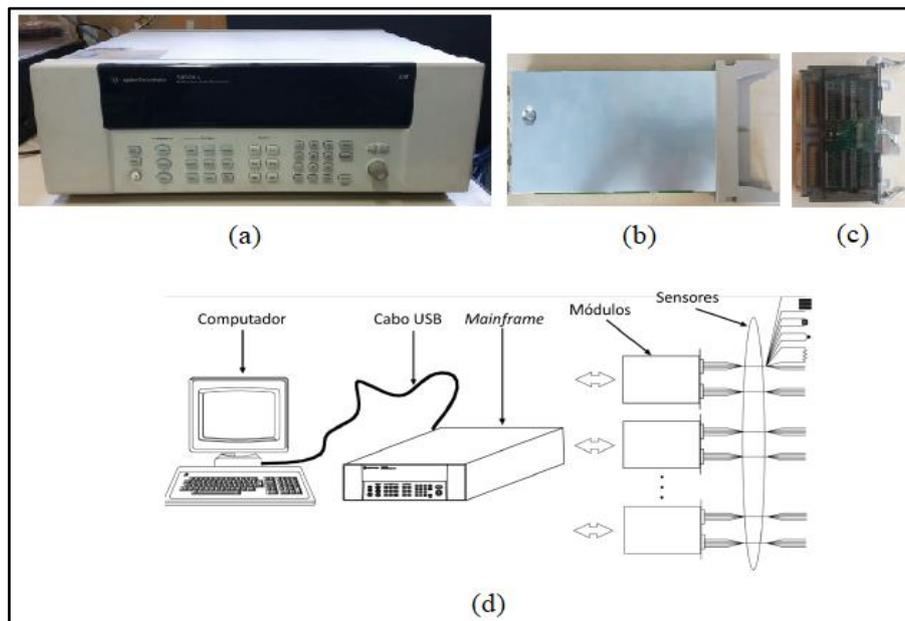
FIGURA 3.7 – Transdutor de pressão do laboratório de energia do CEFET-MG utilizado para medidas de pressão na entrada.



FONTE: Próprio autor

Os termopares e o transdutor de pressão foram acoplados a um sistema de aquisição de dados multifuncional (FIG. 3.8). O sistema é composto por um computador, *mainframe* AGILENT modelo 34980A e módulo 34921T 40-Ch Arm MUX para fixação do bloco com os canais necessários para a aplicação.

FIGURA 3.8 – Sistema multifuncional de aquisição de dados do laboratório de energia do CEFET-MG. (a) *mainframe* AGILENT, (b) módulo 34921T, (c) bloco para fixação de canais e (d) esquema simplificado do sistema



FONTE: Adaptado de DIAS, 2019, p. 141-144

### 3.1.3 Sistema de secagem intercambiável

O aparato experimental utilizado para o estudo da secagem foi desenvolvido no trabalho de Dias (2019). O autor desta tese contribuiu para a construção deste sistema de secagem. O aparato experimental é apresentado na FIG. 3.9. Sistemas de secagem com dimensões similares ao utilizado podem ser encontrados também em Zare e Chen (2009), Bortolaia (2011), Elgamal *et al.* (2017) e Zhao *et al.* (2018).

FIGURA 3.9 – Esquema das partes do sistema de secagem com coluna intercambiável disponível no CEFET-MG.



FONTE: Adaptado de DIAS, 2019, p. 141-144

O sistema é composto por ventilador insuflador de ar, câmara de aquecimento, curva de PVC, câmara de distribuição de ar (plenum), controlador de temperatura e base para acoplar a câmara de secagem e medidores. O mesmo foi escolhido por apresentar um controle eficiente das condições de secagem e facilidade nas medidas experimentais, onde destacam-se (DIAS, 2019):

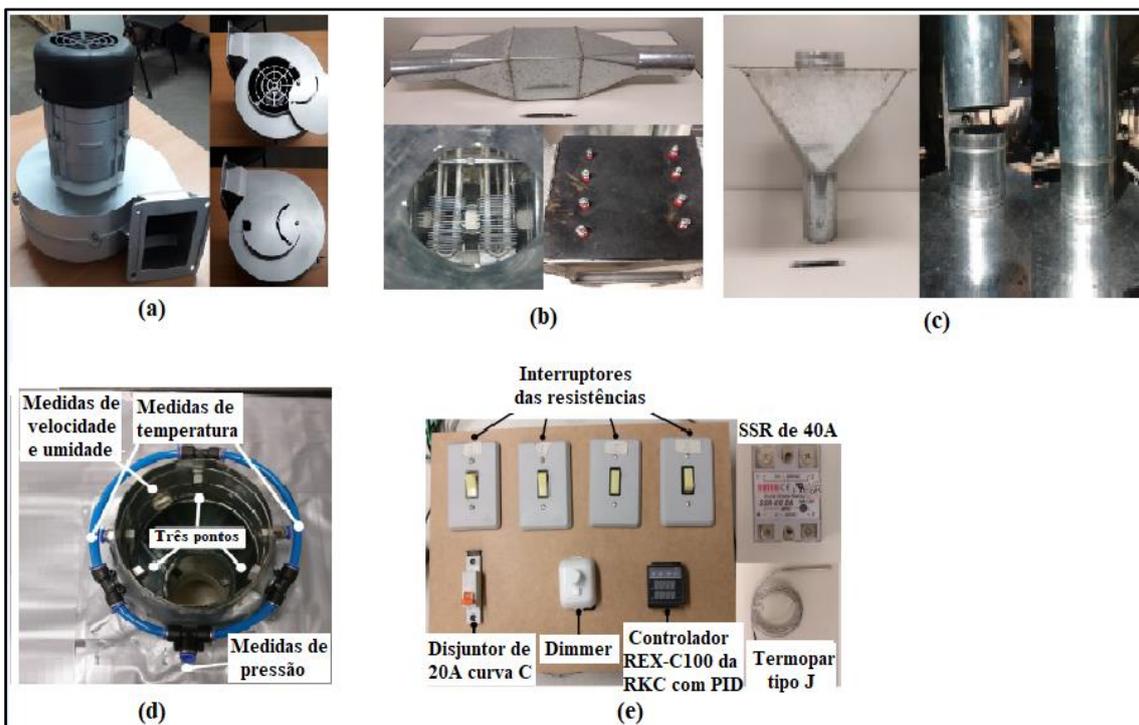
- Controle de temperatura de entrada do ar;
- Regulagem de velocidade do ar de entrada;
- Monitoramento das condições de entrada;
- Monitoramento das condições de saída;
- Baixo custo de fabricação;
- Câmara de secagem intercambiável;
- Limites de operação de 80 °C (ar de secagem) e 4,0 m s<sup>-1</sup>.

O insuflador de ar é constituído por um ventilador Siroco 2P da marca Varivelox (FIG. 3.10a), que utiliza um motor monofásico de 220V e 1/3cv com rotação de 3500 RPM e segundo o fabricante o mesmo tem vazão máxima aproximada de 12 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. O ventilador possui um diafragma na sua constituição (FIG. 3.10a) que permite o controle da vazão de ar na entrada, possibilitando controlar a velocidade do ar de secagem.

A câmara de aquecimento (FIG. 3.10b) é constituída por conjunto de quatro resistores elétricos, aletados, com potência de dissipação de calor para o ar de 1 kW cada, totalizando 4 kW de potência. A câmara foi construída em chapa de aço galvanizado 22 (0,8 mm de espessura) e possui uma área de expansão central e duas reduções nas extremidades, com ângulos de aproximadamente 17°. Cada uma das reduções apresentam diâmetros de 97 mm. Uma luva e uma curva de 90° em PVC foram utilizadas para realizar a união entre a câmara de aquecimento e a de distribuição de ar, também conhecida como plenum.

A câmara de distribuição de ar (plenum) foi fabricada no mesmo material da câmara de aquecimento, esta parte do sistema é necessária para obter uma distribuição do ar mais uniforme próximo da entrada da coluna de secagem. O plenum (FIG. 3.10c) apresenta uma altura de 0,22 m e uma angulação de 35°, e foi isolado termicamente visando obter melhor uniformidade nas condições de contorno. A base para encaixe da coluna de secagem (FIG. 3.10c) tem um diâmetro de 100 mm, nesta também são acoplados medidores de velocidade e umidade relativa do ar, transdutor de pressão e duas entradas para termopares (FIG. 3.10d), sendo uma delas para o controlador de temperatura e outra para as medições nos ensaios. Para a medida da pressão foram criados três pontos ao longo do perímetro da base (0, 120 e 240°), e conectados todos eles por mangueira pneumática ao transdutor de pressão (DIAS, 2019).

FIGURA 3.10 – Detalhes do sistema de secagem. (a) Ventilador siroco, (b) câmara de aquecimento, (c) plenum e base para coluna, (d) pontos de medição e (e) controlador de aquecimento



FONTE: Adaptado de DIAS, 2019, p. 87-96.

O controle de temperatura é realizado por um controlador proporcional, integral e derivativo (PID) acoplado a um relé de estado sólido (SSR) e um termopar do tipo J (FIG. 3.10e), permitindo o controle automatizado da temperatura na entrada da coluna de secagem, ativando ou desativando as resistências na câmara de aquecimento. Este sistema permite que a temperatura na entrada seja mantida constante durante todo o experimento de secagem dos grãos. O módulo de controle de temperatura ainda permite ao usuário ligar e desligar as resistências de maneira independente por meio de interruptores, além de ligar e desligar o ventilador (DIAS, 2019).

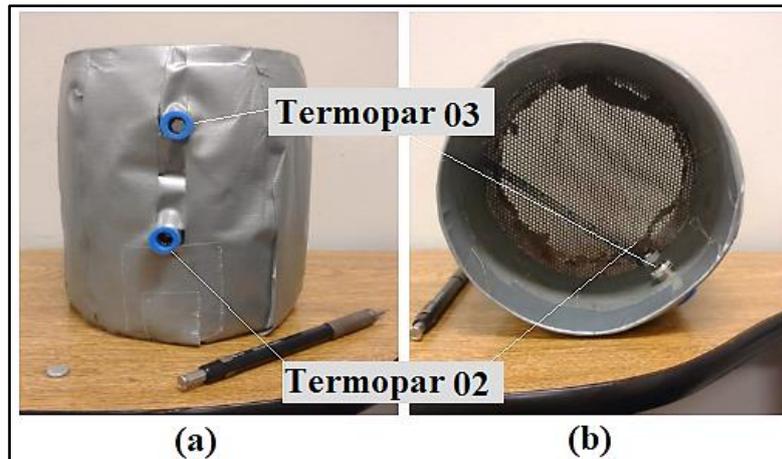
#### 3.1.4 Coluna de secagem em camada delgada

Para a realização dos experimentos em camada delgada foi necessário construir uma coluna de secagem de diâmetro próximo ao da base de acomodação e pequena altura. Para tanto a coluna deve apresentar dimensões que permita avaliar o leito de grãos como uma camada delgada, de forma que as propriedades do ar de secagem não apresentem mudanças significativas com o tempo. Ou seja, a umidade relativa e a temperatura apresentem características estáveis (CHEN e WU, 2001). O projeto da coluna de secagem em camada delgada foi idealizado segundo os trabalhos desenvolvidos por Bortolaia (2011), Borges (2016), Jiang *et al.* (2017) e Prakash e Siebenmorgen (2018).

Para atender aos requisitos para a camada delgada a coluna foi projetada com uma altura máxima de 200 mm e diâmetro de 130 mm, o material de fabricação utilizado foi o aço galvanizado 26 (0,50 mm de espessura). Para conter os grãos no interior da câmara e permitir a passagem de ar ascendente, foi utilizada uma chapa de aço perfurada com 31% de área aberta. A chapa furada foi posicionada a 50 mm a partir da base da coluna para permitir uma superfície de encaixe satisfatória com o plenum. O desenho do projeto de fabricação da câmara está disponível no APÊNDICE B.

A FIG. 3.11 mostra a coluna para secagem em camada delgada construída durante este trabalho. Apesar da altura de 200 mm apenas 30 mm serão utilizados como leito de grão para a secagem. Para monitoramento das temperaturas do ar e do grão dois termopares foram posicionados na coluna, o primeiro a 60 mm (termopar 02) e o segundo a 140 mm (termopar 03) da base. O termopar conectado à base de acoplamento foi usado para monitorar a temperatura do ar de entrada e designado como termopar 01.

FIGURA 3.11 – Coluna para secagem em camada delgada fabricada. (a) Visão da parte externa e (b) da parte interna



FONTE: Próprio autor

Os termopares foram acoplados por meio de conectores pneumáticos e a coluna foi isolada termicamente com manta de cerâmica e fita silver tape.

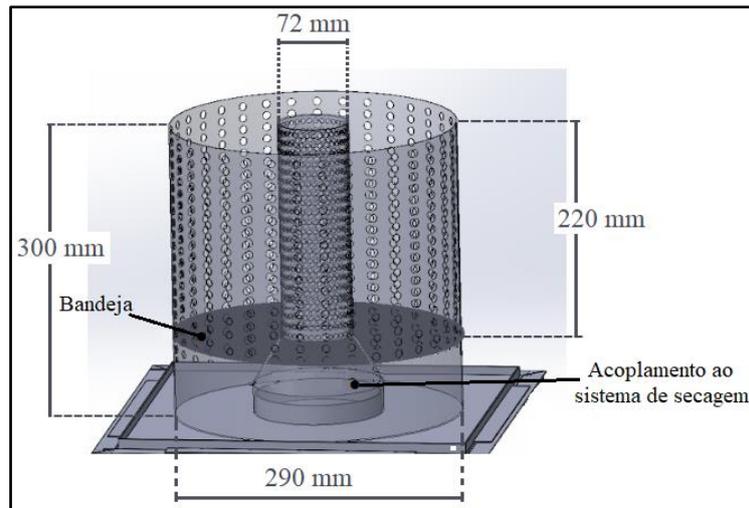
### 3.1.5 Coluna de secagem em camada espessa

Para a realização dos experimentos em camada espessa foi proposta a construção de uma coluna de secagem de geometria cilíndrica e que apresenta uma distribuição radial do ar de entrada. Os estudos para analisar a camada espessa iniciaram-se com visitas à Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, onde se encontra em operação um secador de sementes de grande porte. Este secador apresenta 6 m de altura e 2 m de diâmetro, sendo que a admissão do ar ocorre por um duto central de 0,5 m de diâmetro. O ar é aquecido por fornalha a lenha e insuflado por um ventilador industrial para dentro do duto central que escoo o ar na direção radial no leito de grãos. O duto central é constituído de chapa furada com aproximadamente 30% de área aberta, enquanto a carcaça externa do secador é feita de madeira e tela de material plástico, sendo a área aberta de aproximadamente 20%.

A construção da coluna de secagem em camada espessa foi limitada pela capacidade e geometria do plenum (APÊNDICE B). Desta forma a câmara não deve ultrapassar 300 mm de diâmetro, pois valores maiores implicam em dificuldades no equilíbrio da massa. Já em relação à altura, segundo Sharon *et al.* (2016) 200 mm é a altura mínima necessária para que o leito seja considerado de camada espessa.

Assim a câmara de secagem foi projetada com um diâmetro de 290 mm e altura de 300 mm, também foi escolhido um diâmetro de 72 mm para construção do duto central (FIG. 3.12). O desenho do projeto de fabricação da câmara pode ser encontrado no APÊNDICE B.

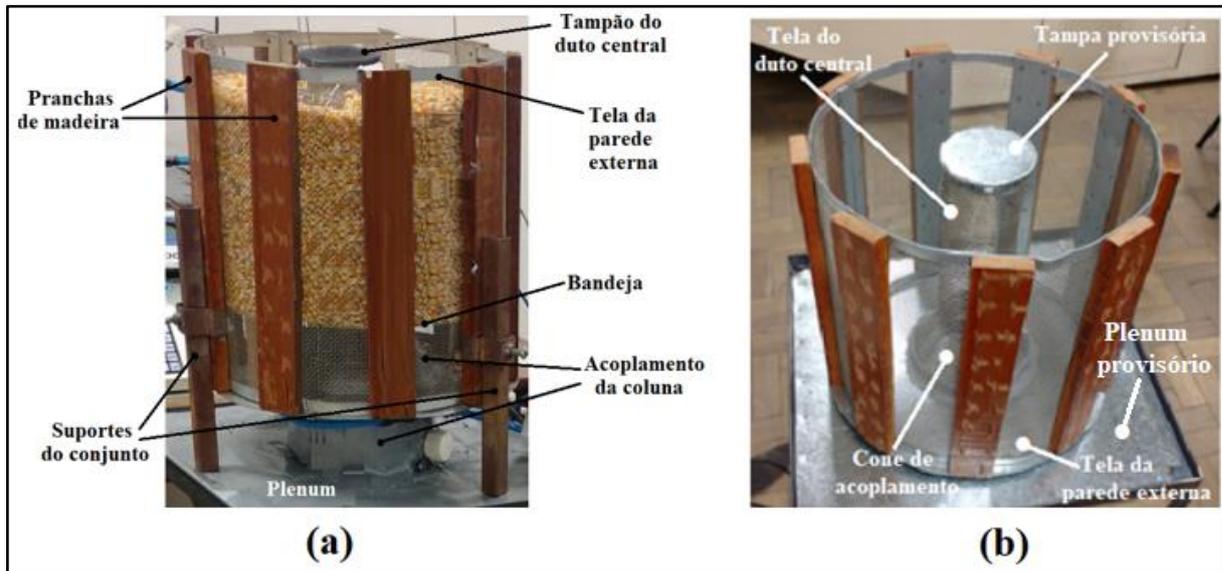
FIGURA 3.12 – Dimensões da coluna de secagem para a camada espessa construída



FONTE: Próprio autor

O material utilizado para toda a estrutura foi o aço galvanizado, a parede da parte externa tem uma área aberta (AA) final próxima a 20%, e o duto central aproximadamente 32% da AA final. Uma bandeja de mesmo material foi projetada para acomodar o milho (FIG. 3.12 e 3.13a) a uma altura adequada ao escoamento de ar, evitando regiões mortas (produto com fluxo zero de ar). Desta forma apenas 220 mm da altura da câmara podem ser utilizados na secagem do milho. As chapas da parede externa foram dobradas e fixadas em uma estrutura de madeira. Um tampão de borracha foi usado no duto central para controlar a altura do escoamento do ar. A coluna de secagem em camada espessa foi acoplada ao sistema de secagem disponível por uma junção na forma de um tronco de cone, tendo 132 mm de diâmetro maior. Foram construídos três suportes para apoiar a coluna de secagem com o produto ao plenum, melhorando assim a segurança do conjunto. A FIG. 3.13 apresenta as partes da coluna de secagem com o produto a ser seco e vazia.

FIGURA 3.13 – Detalhes da coluna de secagem em camada espessa construída. (a) Visão com o produto a ser seco e (b) vazia sem a bandeja de contenção.



FONTE: Próprio autor

A coluna foi construída em escala reduzida em relação ao secador de grande porte da EMBRAPA. Sendo mantida a razão (RL) entre o comprimento da linha de milho (LM) e o diâmetro do duto central (DC). A linha de milho é o comprimento em linha reta entre dois pontos opostos, um deles localizado no duto central e o outro na parede externa da coluna de secagem. Desta forma, para o secador de grande porte têm-se

$$RL = \frac{LM}{DC} = \frac{2,0 - 0,5}{0,5} = 1,50 \quad (3.1)$$

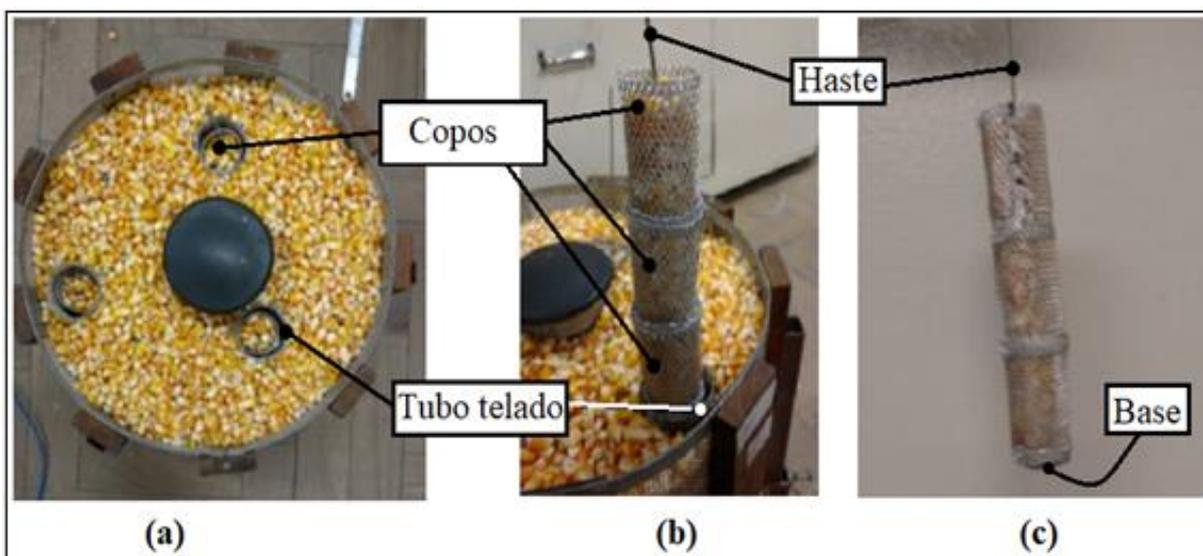
Para a câmara de secagem em camada espessa construída têm-se

$$RL = \frac{LM}{DC} = \frac{290 - 72}{72} = 1,51 \quad (3.2)$$

Para monitorar o teor de umidade do milho durante a secagem foram construídos nove pequenos compartimentos cilíndricos, designados apenas como “copos”. Cada copo (FIG. 3.14) foi projetado com um diâmetro de 35 mm e altura de 60 mm, fabricados em chapa galvanizada furada com 40% de AA.

Foram construídas três pequenas colunas cilíndricas em aço galvanizado furado (FIG. 3.14a, b), com cerca de 60% de AA, para acomodar os copos dentro do leito de grãos. Cada coluna móvel acomoda até três copos cilíndricos com dimensões de 40 mm de diâmetro e 220 mm de altura. Para facilitar a remoção e adição dos copos durante o experimento foram construídas três pequenas hastes com uma base (FIG. 3.14b, c), favorecendo o empilhamento.

FIGURA 3.14 – Materiais auxiliares para a secagem de milho em camada espessa. (a) Leito com o milho e materiais auxiliares, (b) retirada e adição dos copos e (c) detalhe do empilhamento de três copos.

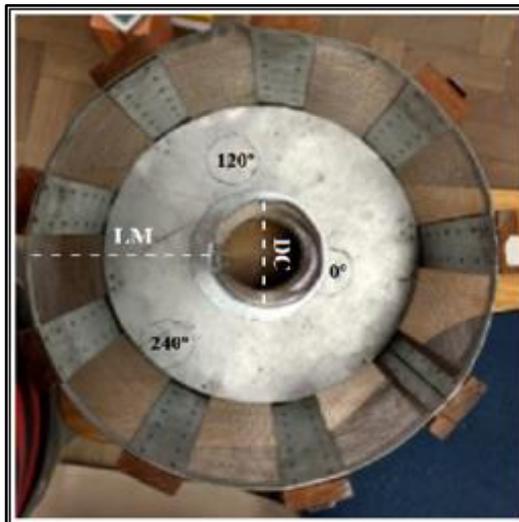


FONTE: Próprio autor

As três colunas foram posicionadas nos ângulos 0, 120 e 240° no interior da câmara de secagem (FIG. 3.15), desta forma é possível obter medidas de teor de umidade dos grãos em três alturas distintas para cada ângulo, em três posições radiais.

A construção dos copos e de suas colunas de contenção, foram idealizadas visando: ocupar o menor espaço possível no interior da câmara de camada espessa; acomodar uma massa suficiente para mensuração (entre 30 e 40 g) e possibilitar maior facilidade para as medições do teor de umidade do milho.

FIGURA 3.15 – Visão do interior da coluna de secagem em camada espessa com as posições angulares e radiais para amostragem do teor de umidade do milho.



FONTE: Próprio autor

A construção da câmara de secagem em camada espessa proposta neste trabalho de tese, foi realizada pelo próprio autor, sendo que a geometria foi baseada em um secador industrial em operação.

### 3.2 Procedimentos experimentais

Neste item são descritos os procedimentos necessários para obtenção da umidade de equilíbrio, as curvas de secagem em camada delgada e a secagem em camada espessa, para os grãos de milho. Os experimentos em camada delgada foram realizados nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, e velocidades de 0,5; 1,0 e 1,5 m/s para o ar de secagem. Para a camada espessa, os experimentos foram realizados nas mesmas temperaturas anteriores e nas velocidades de 2,0 e 4,0 m/s. Estas temperaturas e velocidades foram escolhidas para análise devido serem comumente encontradas nos trabalhos de secagem de grãos (RAJBARAN e ZARE, 2013; AMANTEA *et al.*, 2013; LIU *et al.*, 2015; OKUNOLA *et al.*, 2021; ZADHOSSEIN *et al.*, 2022), e manutenção da integridade física dos grãos segundo Brooker *et al.* (1992). Os testes foram realizados em dias em que a umidade relativa do ar estava em aproximadamente 60%. Os grãos colhidos na EMBRAPA apresentaram um teor de umidade inicial próximo de 22%, e foram embalados em sacos plásticos e acondicionados em geladeira, visando a manutenção do teor de umidade (BRASIL, 2009). Para a realização dos procedimentos os grãos, mantidos resfriados, foram retirados da geladeira 24 horas antes do início dos ensaios, e deixados embalados nos respectivos sacos plásticos a temperatura ambiente (BRASIL, 2009). As incertezas foram estimadas e tratadas estatisticamente.

### 3.2.1 Teores de umidade dos grãos e de equilíbrio

Para a determinação do teor de umidade dos grãos foram utilizadas balanças digitais, estufa (FIG 3.2 e 3.3) e bandejas de secagem para acomodar os grãos. O procedimento geral de determinação mais utilizado para produtos agrícolas consiste em (BRASIL, 2009):

- a) Ligar a estufa de circulação de ar e ajustar a temperatura do termopar para 105°C;
- b) Aguardar a estabilização da temperatura no valor ajustado até uma variação máxima de  $\pm 1^\circ\text{C}$ ;
- c) Ligar a balança digital e aguardar a estabilização das partes elétricas;
- d) Identificar a bandeja de secagem e pesá-la vazia;
- e) Adicionar a massa grãos na bandeja e fazer a pesagem do conjunto;
- f) Colocar o conjunto massa-bandeja na estufa e aguardar 24 horas de secagem;
- g) Após o tempo estabelecido retirar o conjunto da estufa e deixar resfriar a temperatura ambiente em tijolos refratários;
- h) Fazer novamente a pesagem do conjunto massa-bandeja e subtrair a massa da bandeja;
- i) Realizar o procedimento em duplicata;
- j) Utilizar as EQ. 2.1 a 2.4 para cálculo do teor de umidade dos grãos.

A massa utilizada para determinação do teor de umidade inicial foi suficiente para completar o volume da bandeja, aproximadamente 200 g, entretanto, durante os procedimentos de secagem em camada delgada e espessa massas menores ou maiores foram utilizadas. Os resultados experimentais das medidas dos teores de umidade em camada delgada e espessa encontram-se nos itens 4.3 e 4.5, respectivamente.

O teor de umidade de equilíbrio do milho foi determinado experimentalmente nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70°C. Os resultados estão apresentados no item 4.2. Para o experimento o seguinte procedimento foi seguido (BRASIL, 2009):

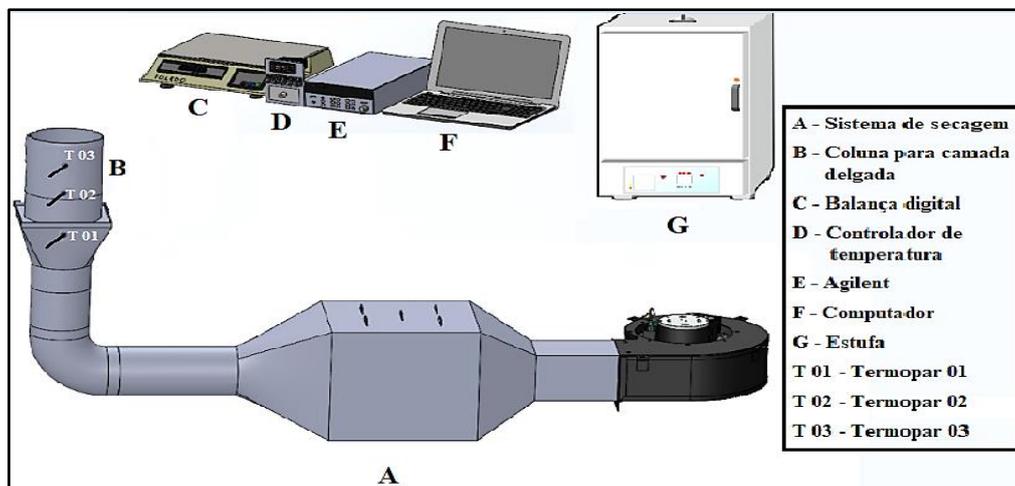
- a) Ligar a estufa de circulação de ar e ajustar a temperatura do termopar para o valor desejado;
- b) Aguardar a estabilização da temperatura no valor ajustado até uma variação máxima de  $\pm 1^\circ\text{C}$ ;
- c) Ligar a balança digital e aguardar a estabilização das partes elétricas;
- d) Identificar a bandeja de fundo telado;
- e) Pesar aproximadamente 200g de amostra e adicionar na bandeja;

- f) Medir a umidade relativa do ar e a temperatura ambiente do laboratório;
- g) Colocar o conjunto amostra-bandeja na estufa;
- h) Ligar o sistema de renovação/exaustão de ar da estufa;
- i) Medir a umidade relativa do ar e a temperatura ambiente no interior da estufa a cada medição de massa da amostra;
- j) Para o primeiro dia de testes retirar as amostras da estufa a cada 30 minutos por 150 minutos, e rapidamente fazer a medida da massa;
- k) Para o segundo dia de testes em diante medir a massa a cada 24 horas;
- l) Finalizar as medições periódicas quando a variação da massa durante três dias consecutivos for igual a resolução da balança utilizada;
- m) Realizar o procedimento de determinação do teor de umidade;
- n) Realizar o experimento em duplicata.
- o) Proceder os cálculos usando as EQ. 2.1 e 2.2.

### 3.2.2 Camada delgada

A realização dos testes em camada delgada seguiu um planejamento experimental do tipo fatorial ( $3^2$ ), sendo realizado em três temperaturas distintas e três velocidades de escoamento do ar. Para a realização dos testes foram necessários os seguintes equipamentos: sistema de secagem, coluna de camada delgada, sistema de aquisição de dados - Agilent, termopares, controlador de temperatura, balança digital de maior precisão, computador e estufa de secagem. A FIG. 3.16 apresenta o diagrama esquemático dos equipamentos.

FIGURA 3.16 – Esquema de equipamentos para o procedimento experimental em camada delgada



FONTE: Adaptado de DIAS, 2019, p. 87-96

Durante os experimentos foram registrados, a cada 10 minutos, a massa do leito de milho, umidade relativa do ar e temperatura ambiente. O tempo de secagem foi de 150 minutos para cada ensaio (DA COSTA *et al.*, 2023; JOHANN *et al.*, 2018; PRAKASH e SIEBENMORGEN, 2018; ZHANG *et al.*, 2013; ZARE e CHEN, 2009). Apesar dos experimentos serem conduzidos sem controle efetivo da umidade relativa do ar, os mesmos só foram realizados em dias de céu aberto, com a umidade relativa do ar entre 50 e 60% (INMET, 2018), garantindo um grau satisfatório para comparação entre os testes. O planejamento experimental utilizado está descrito na TAB. 3.1.

TABELA 3.1 – Planejamento para os experimentos de secagem em camada delgada

Ensaio	Temperatura de secagem (°C)	Velocidade do ar de secagem (m/s)	Massa de milho úmido (g)	Altura da camada de milho (cm)	Teor de umidade inicial (% bs)	Tempo de secagem (min.)
Teste 01	40	0,5	250	3	22	150
Teste 02	50					
Teste 03	60					
Teste 04	40	1,0				
Teste 05	50					
Teste 06	60					
Teste 07	40	1,5				
Teste 08	50					
Teste 09	60					

O procedimento experimental para determinação da curva de secagem foi realizado por meio das seguintes etapas:

- a) Homogeneizar o milho no saco plástico de origem e determinar o teor de umidade inicial de acordo o item 3.2.1;
- b) Ligar o Agilent, o computador e a balança digital e aguardar a estabilização dos sistemas elétricos;
- c) Acoplar o termopar do controlador de temperatura e o termopar 01 na base do sistema de secagem (FIG. 3.16);
- d) Acoplar a coluna de secagem em camada delgada ao sistema de secagem;
- e) Ligar o ventilador insuflador e regular a velocidade para o valor desejado (TAB. 3.1) utilizando um termo-anemômetro de fio quente (FIG. 3.4);
- f) Retirar a coluna de secagem em camada delgada do sistema de secagem;

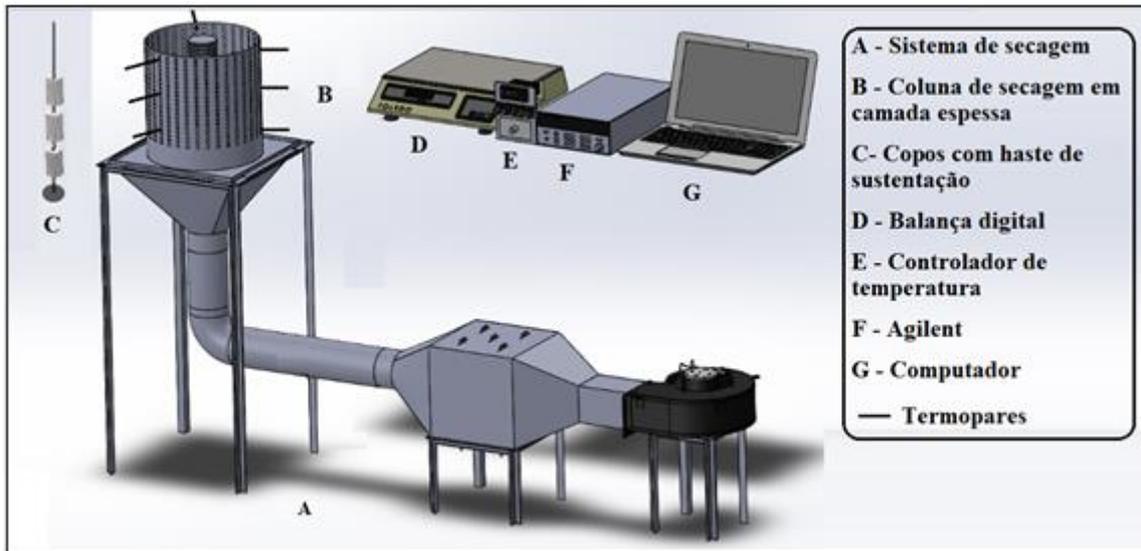
- g) Ligar o controlador de temperatura e ajustar para o valor desejado (TAB. 3.1);
- h) Ligar os resistores elétricos e aguardar a estabilização do valor de temperatura ajustado até  $\pm 1^\circ\text{C}$ ;
- i) Homogeneizar o milho no saco plástico de origem e pesar aproximadamente 250 g de milho úmido, utilizar balança digital de melhor precisão;
- j) Acoplar os termopares 02 e 03 na coluna de camada delgada (FIG. 3.16) e no Agilent;
- k) Fazer as medidas iniciais de temperatura do leito de grãos, temperatura e umidade relativa do ar de secagem;
- l) Acoplar a coluna de secagem em camada delgada ao sistema de secagem e iniciar o teste;
- m) Fazer medidas de temperatura e umidade relativa do ar de secagem, e de temperatura e massa do leito de grãos a cada 10 minutos, durante 150 minutos;
- n) Ao final do tempo de secagem determinar o teor de umidade final do leito de grãos;
- o) Proceder o tratamento dos dados experimentais.

O procedimento realizado permitiu determinar a curva de secagem do milho, cinética da secagem, para os valores de temperatura e velocidade do ar definidos na TAB. 3.1. A determinação dos teores de umidade inicial e final do leito de grãos permitiu relacionar a variação da massa durante a secagem com a perda de água, sendo possível encontrar a umidade média a cada medição. Os resultados do experimento em camada delgada e a discussão estão apresentados no item 4.3.

### 3.2.3 Camada espessa

Para a realização dos testes nesta etapa do trabalho, foram utilizados os mesmos equipamentos do teste de camada delgada. Entretanto, no lugar da coluna de secagem em camada delgada foi utilizada a coluna em camada espessa. Também foram utilizados: transdutores de pressão, termopares e balança digital de maior capacidade. A FIG 3.17 apresenta o diagrama dos equipamentos. Fotos desta parte do trabalho podem ser encontradas no APÊNDICE C.

FIGURA 3.17 – Esquema de equipamentos para o procedimento experimental em camada espessa



FONTE: Próprio autor

O planejamento experimental da secagem em camada espessa foi realizado nas mesmas temperaturas da camada delgada, entretanto, foram selecionadas duas velocidades para serem estudadas com base nas dimensões da coluna de secagem e capacidade do ventilador. Desta forma, a máxima velocidade permitida sem causar fluidização no leito de grãos foi de  $4,0 \text{ m.s}^{-1}$ , sendo selecionada juntamente com um valor intermediário de  $2,0 \text{ m.s}^{-1}$  (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Assim o planejamento experimental tem uma forma fatorial ( $3 \times 2$ ), sendo cada fator e níveis representado na TAB. 3.2.

TABELA 3.2 – Planejamento para os experimentos de secagem em camada espessa.

Ensaio	Temperatura de secagem (°C)	Velocidade do ar de secagem (m/s)	Massa de milho úmido (g)	Altura da camada de milho (cm)	Massa de milho nos copos (g)	Teor de umidade inicial (% bs)	Tempo de secagem (min.)
Teste 10	40	2,0	9400	21	37	22	150
Teste 11	50						
Teste 12	60						
Teste 13	40	4,0					
Teste 14	50						
Teste 15	60						

Um total de 11 termopares foram utilizados neste procedimento e foram numerados de 0 a 10, sendo o termopar 0 usado para o controlador de temperatura e o termopar 01 acoplado a base de encaixe da coluna no plenun, os outros foram posicionados ao longo do leito de grãos segundo a TAB. 3.3.

TABELA 3.3 – Posição dos termopares no leito de grãos.

Termopar	Posição	
	Axial, z	Azimutal, $\varphi$
02	$(1/3) z$	$0^\circ$
03	$(2/3) z$	$0^\circ$
04	z	$0^\circ$
05	$(1/3) z$	$120^\circ$
06	$(2/3) z$	$120^\circ$
07	z	$120^\circ$
08	$(1/3) z$	$240^\circ$
09	$(2/3) z$	$240^\circ$
10	z	$240^\circ$

Foram utilizados 9 copos posicionados no interior da coluna de secagem em camada espessa segundo a TAB. 3.4.

TABELA 3.4 – Posição dos copos no leito de grãos.

Copo	Coordenadas da posição média		
	Radial, r médio	Azimutal, $\varphi$	Axial, z
01	0	$0^\circ$	0
02	0	$0^\circ$	$(1/2) z$
03	0	$0^\circ$	z
04	$(1/2) r$	$120^\circ$	0
05	$(1/2) r$	$120^\circ$	$(1/2) z$
06	$(1/2) r$	$120^\circ$	z
07	r	$240^\circ$	0
08	r	$240^\circ$	$(1/2) z$
09	r	$240^\circ$	z

O procedimento experimental para determinação da secagem do milho em camada espessa foi realizado por meio das seguintes etapas:

- Homogeneizar o milho no saco plástico de origem e determinar o teor de umidade inicial de acordo o item 3.2.1;
- Ligar o Agilent, o computador e a balança digital e aguardar a estabilização dos sistemas elétricos;
- Acoplar o termopar do controlador de temperatura e o termopar 01 na base do sistema de secagem (APÊNDICE C);

- d) Acoplar a coluna de secagem em camada espessa ao sistema de secagem;
- e) Ligar o ventilador insuflador e regular a vazão para o valor desejado (TAB. 3.2) utilizando um termo-anemômetro de fio quente;
- f) Retirar a coluna de secagem em camada espessa do sistema de secagem;
- g) Ligar o controlador de temperatura e ajustar para o valor desejado (TAB. 3.2);
- h) Ligar as resistências elétricas e aguardar a estabilização do valor de temperatura ajustado até  $\pm 1^\circ\text{C}$ ;
- i) Pesar o conjunto coluna de camada espessa e copos vazios;
- j) Homogeneizar o milho no saco plástico de origem;
- k) Posicionar as colunas de contenção dos copos e adicionar o milho;
- l) Adicionar o máximo possível de massa de milho em cada copo, deixar um espaço suficiente para empilhar os mesmos com segurança.
- m) Posicionar os copos com milho no interior do leito (TAB. 3.4).
- n) Adicionar mais milho ao leito até um total de 14000 g.
- o) Acoplar os termopares 02 a 10 na coluna com milho (TAB. 3.3) e no Agilent;
- p) Fazer as medidas iniciais de temperatura do leito de grãos, temperatura e umidade relativa do ar de secagem e pressão estática;
- q) Acoplar a coluna de secagem em camada espessa ao sistema e iniciar o teste;
- r) Fazer medidas de temperatura e umidade relativa do ar de secagem, de temperatura e massa do leito de grãos e pressão estática a cada 10 minutos, durante 150 minutos;
- s) Fazer medidas da massa dos copos entre medições da massa do leito, sendo a primeira e a última em intervalo de 15 minutos, as demais em intervalos de 20 minutos;
- t) Ao final do tempo de secagem determinar o teor de umidade final do milho em cada um dos copos segundo procedimento em 3.2.1;
- u) Proceder o tratamento dos dados experimentais.

Para as medidas das massas do leito de grãos o mesmo foi retirado do sistema de secagem, pesado em balança de maior capacidade e recolocado novamente no equipamento, sendo um tempo máximo de 10 segundos observado para este procedimento. As medidas de massas dos copos foram realizadas individualmente usando uma balança de maior precisão, para tanto, cada copo foi retirado e retornado para o secador em um período de tempo não superior a 25 segundos. Os resultados do experimento em camada espessa, assim como a discussão estão apresentados no item 4.5.

### 3.2.4 Propriedades físicas do milho

O comportamento da porosidade do leito, massa específica e calor específico dos grãos de milho com o teor de umidade foram avaliados. Os métodos para determinação destas propriedades são baseados na literatura, seja de forma completa ou parcial.

Para a determinação da porosidade do leito foi utilizada a metodologia de complementação de volume proposta por Botelho *et al.* (2018), o procedimento adaptado foi dividido em etapas da seguinte forma:

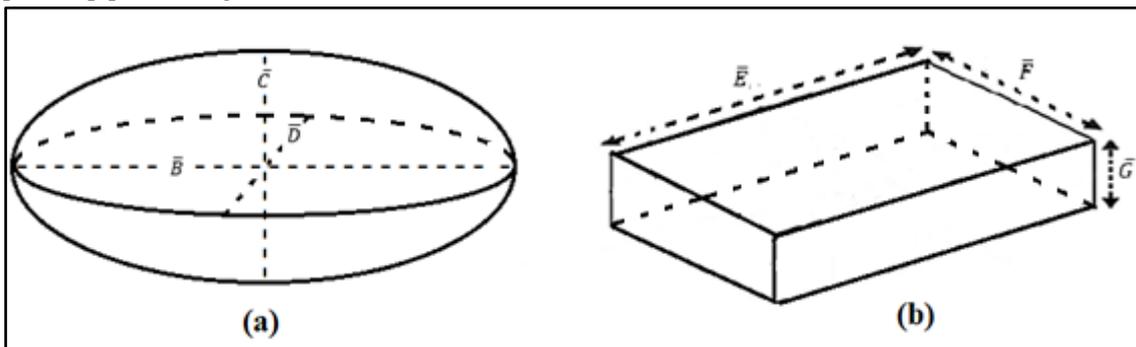
- a) Determinar o teor de umidade do milho a ser ensaiado segundo procedimento em 3.2.1;
- b) Adicionar uma massa de grãos de milho em uma proveta (A) de 250 mL até a última graduação volumétrica. A adição deve ser feita de forma que os grãos não fiquem compactados no recipiente;
- c) Medir em uma outra proveta (B) ou equipamento de melhor precisão um volume igual ao do item “a” de tolueno;
- d) Escoar lentamente o volume da proveta (B) na proveta (A) até completar o volume da proveta (A);
- e) Medir o volume de tolueno que restou na proveta (B);
- f) Realizar o procedimento com 3 ou 5 repetições;
- g) Proceder os cálculos;
- h) Repetir o procedimento para diferentes valores de teor de umidade do milho;
- i) Encontrar um modelo empírico que represente o comportamento da porosidade com o teor de umidade dos grãos.

A massa específica dos grãos foi determinada utilizando do procedimento de determinação da porosidade, fazendo a pesagem da massa da proveta (A) vazia e com grãos antes da adição do tolueno. Assim foi encontrado o volume aproximado dos grãos contidos no recipiente, e a massa específica. Este procedimento foi realizado em diferentes teores de umidade para proposição de um modelo empírico.

Para a determinação do calor específico dos grãos foi utilizado o método da mistura calorimétrica. Este método foi usado por Ribeiro *et al.* (2002) na determinação do calor específico de frutas. Bala (2017) afirma que o calor específico de grãos cereais é usualmente determinado pelo método de misturas utilizando a água destilada como fluido calorimétrico. O procedimento consiste na utilização de um calorímetro. Inicialmente determina-se a capacidade calorífica do calorímetro utilizando água destilada em diferentes temperaturas, após atingir o equilíbrio térmico adiciona-se uma massa de grãos no calorímetro, agita-se o sistema até o um novo equilíbrio térmico (grãos-água) ser atingido. Para o cálculo do calor específico foram utilizadas as equações da calorimetria disponíveis em Ribeiro *et al.* (2002) e Bala (2017).

A determinação da área específica volumétrica foi realizada segundo dois procedimentos experimentais e comparados os resultados. O primeiro procedimento proposto por Oliveira *et al.* (2014) considera o grão de milho na forma geométrica de um esferoide escaleno tri-axial (FIG 3.18a), sendo medidos os parâmetros  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$  e  $\bar{D}$  para encontrar a área ( $A_{gr\tilde{a}o}$ ) e o volume ( $V_{gr\tilde{a}o}$ ) do grão, segundo descrito no item 3.3.4. O segundo procedimento foi adaptado do modelo utilizado por Borges (2016). Neste, o grão é considerado um paralelepípedo retangular (FIG. 3.18b), sendo necessários medir os parâmetros geométricos  $\bar{E}$ ,  $\bar{F}$  e  $\bar{G}$  para encontrar a área e o volume do grão.

FIGURA 3.18 – Modelos geométricos para grãos de milho. (a) Esferoide escaleno triaxial e (b) paralelepípedo retângulo.



FONTE: Próprio autor

Para determinar a área específica foram escolhidos 20 grãos aleatórios em um volume de milho (BORGES, 2016), em cada grão foram feitas as medidas médias dos parâmetros dados na FIG. 3.18, um paquímetro devidamente calibrado foi utilizado. Os resultados dos experimentos realizados para obtenção das propriedades físicas do milho, assim como a discussão destes estão apresentados no item 4.1.

### 3.2.5 Análise de incerteza

Durante a realização dos procedimentos experimentais foram quantificadas as incertezas nas medições, para tanto, foram consideradas a distribuição estatística (tipo A) e os certificados de calibração dos equipamentos (tipo B). As incertezas de diferentes tipos foram combinadas usando a soma quadrática (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008). Durante este trabalho foram mensuradas nos experimentos as grandezas: temperatura, pressão, velocidade, massa e umidade reativa do ar. As planilhas para estimativa das incertezas foram produzidas identificando cada fonte, conforme descrito em Albertazzi e Sousa (2008). Para as incertezas na resolução dos equipamentos foi utilizada uma distribuição retangular.

As medidas de temperatura foram realizadas utilizando termopares previamente calibrados, segundo procedimento descrito em Dias (2019). As fontes de incerteza consideradas foram a resolução, correção e incerteza do padrão de temperaturas usado na calibração, incerteza e correção na calibração dos termopares, resolução e a incerteza nas medições (repetitividade) em cada termopar.

As medidas de pressão foram realizadas utilizando transdutores acoplados ao sistema de secagem. Estes equipamentos apresentaram certificados de calibração. Para estimar a incerteza nas medidas de pressão foram consideradas a resolução e a correção do transdutor, a incerteza na calibração e a repetitividade das medições experimentais

A incerteza na velocidade foi estimada de acordo laudo de calibração fornecido pelo fabricante do termo-anemômetro de fio quente. Para estas medidas foram consideradas como fontes de incerteza: resolução e correção do termo-anemômetro, incerteza na calibração e a incerteza nas medidas experimentais.

As medidas das massas foram utilizadas para estimar a incerteza no teor de umidade do leite. As fontes de incerteza consideradas foram a resolução da balança utilizada e a repetitividade nas medidas experimentais. A incerteza combinada foi estimada utilizando a soma quadrática das incertezas na definição do teor de umidade (EQ. 2.1).

A identificação da incerteza nas equações ajustadas aos dados experimentais obtidas neste trabalho foi realizada utilizando a análise de variâncias (ANOVA), para tanto foi utilizado o *Microsoft Excel*®.

### 3.3 Problema físico

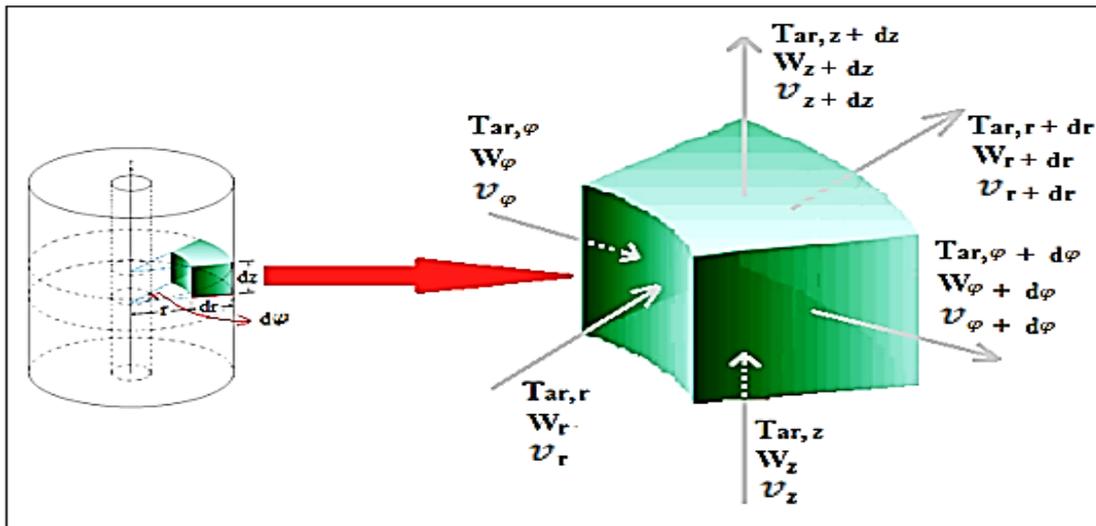
A modelagem matemática para o processo de secagem de grãos de milho tem como base as equações do modelo de *Michigan* (BROOKER *et al.*, 1992; BORTOLAIA, 2011, SOUZA, 2013). Entretanto, visando uma melhor representação do fenômeno, foram feitas algumas modificações e considerações no desenvolvimento do mesmo.

Para a proposição do modelo a ser desenvolvido neste trabalho as seguintes considerações foram feitas:

- a) A porosidade do leito é dada como uma função do teor de umidade do grão (determinação empírica);
- b) O calor específico dos grãos é dado como uma função do teor de umidade do grão (determinação empírica);
- c) A massa específica dos grãos é variável;
- d) A temperatura e a pressão do ar de secagem no interior do duto central são uniformes;
- e) A condução de calor devido ao contato entre os grãos é desprezível;
- f) O fluxo de ar no interior do duto central é constante;
- g) A velocidade no interior do leito de grãos é dada pela Lei de Darcy e a equação de Shedd, sendo o coeficiente de permeabilidade isotrópico;
- h) Consideram-se as variações temporais na temperatura e umidade do ar;
- i) A evaporação da água nos grãos ocorre na temperatura de secagem;
- j) A transferência de calor por convecção é dominante;
- k) A secagem dos grãos em camada delgada e o equilíbrio higroscópico ar-grãos são dados por equações matemáticas empíricas;
- l) Escoamentos tridimensionais são considerados;
- m) Utilização do método dos elementos finitos para a solução das equações diferenciais parciais.

Na FIG. 3.19 é mostrado o volume de controle selecionado na massa de grãos para análise do processo de transferência de calor e massa durante a secagem. O esquema representa um volume de controle relativo aos grãos contidos entre o duto central de insuflação do ar de secagem e a parede externa do secador cilíndrico.

FIGURA 3.19 – Esquema para o volume de controle em coordenadas cilíndricas.



FONTE: Próprio autor

Durante os testes experimentais foi observado que propriedades, tais como temperatura, velocidade e pressão variam axial e radialmente, desta forma o fenômeno foi considerado tridimensional. As equações do modelo são apresentadas nos itens 3.3.1 a 3.3.6.

### 3.3.1 Modelo para o fluxo de ar no leito de grãos

Quando o ar é forçado através de uma camada de grãos, ocorre a queda de pressão devido a uma resistência ao escoamento. Isto ocorre como resultado da energia perdida através do atrito. Assim, um modelo de previsão para esta queda de pressão torna-se necessário para um estudo mais eficiente do processo de secagem.

O modelo mais utilizado em trabalhos de escoamento do ar em camadas de grãos de produtos agrícolas em leitos é o proposto por Shedd (1953), devido a simplicidade no equacionamento e o sucesso conseguido em testes com mais de vinte tipos de grãos (GÓRNICKI e KALETA, 2015).

A equação de Shedd foi escolhida para modelar o escoamento do ar neste trabalho. Shedd sugeriu uma equação para descrever a relação entre o gradiente de pressão no leito fixo de grãos e a velocidade do ar, a mesma tem a forma (SOUZA, 1996; BORGES, 2002; GÓRNICKI e KALETA, 2015)

$$v_{ar} = A_s \left( \frac{\partial p}{\partial n} \right)^B \quad \text{ou} \quad \vec{v}_{ar} = A_s |\nabla p|^B \quad (3.3)$$

em que  $n$  representa a direção do gradiente de pressão,  $A_s$  e  $B$  são constantes que dependem do tipo de grão, umidade e temperatura do leito.

As equações das constantes não são apresentadas aqui, pois foram determinadas para o milho utilizando os dados experimentais de Abou-El-Hana e Younis (2008). Este trabalho foi escolhido por apresentar medidas para queda de pressão em uma coluna com milho realizadas nas mesmas temperaturas do ar de secagem deste trabalho. As equações para as constantes  $A_s$  e  $B$  usadas neste trabalho são as do item 4.4, nas EQ. 4.10 e 4.11.

As EQ. (3.4) a (3.11) apresentam como referências os trabalhos realizados por Souza (1996); Borges (2002) e Faoro (2018) durante o desenvolvimento dos seus modelos matemáticos.

A velocidade de escoamento do ar também pode ser dada pela equação da conservação da quantidade de movimento, ou Lei de Darcy, ficando na forma

$$\vec{v}_{ar} = \frac{-k_0}{\mu} (\nabla p - \rho_{ar} \vec{g}) \quad (3.4)$$

em que  $k_0$  representa a permeabilidade do meio poroso,  $\mu$  a viscosidade absoluta do ar seco e  $\vec{g}$  o vetor aceleração da gravidade.

A razão entre a permeabilidade e a viscosidade é conhecida como coeficiente de permeabilidade ( $K$ ) e considerando o efeito da gravidade desprezível em relação a variação de pressão, a EQ. (3.4) torna-se

$$\vec{v}_{ar} = -K \nabla p \quad (3.5)$$

Substituindo a EQ. (3.3) na EQ. (3.5) obtêm-se uma equação para a determinação do coeficiente de permeabilidade, que em coordenadas tridimensionais cilíndricas apresenta a forma

$$K = A_s |\nabla p|^{(B-1)} = A_s \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right)^2 + \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{(B-1)}{2}} \quad (3.6)$$

As componentes da velocidade de escoamento podem ser expressas utilizando a EQ. (3.5) na forma (GRAY *et al.*, 2014)

$$v_r \vec{u}_r + v_\varphi \vec{u}_\varphi + v_z \vec{u}_z = \left( -K \frac{\partial p}{\partial r} \right) \vec{u}_r + \left( -K \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) \vec{u}_\varphi + \left( -K \frac{\partial p}{\partial z} \right) \vec{u}_z \quad (3.7)$$

Comparando ambos os lados da EQ. (3.7) têm-se que

$$v_r = -K \frac{\partial p}{\partial r} ; v_\varphi = -K \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} ; v_z = -K \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3.8)$$

As EQ. (3.5) a (3.8) permitem calcular o coeficiente de permeabilidade e o campo de velocidade de escoamento a partir do campo de pressão, desta forma para a completa solução do modelo é necessária uma equação para calcular o campo de pressão. Para isto é utilizada a equação da continuidade considerando a variação da porosidade e da massa específica do ar de secagem desprezível em relação a variação da pressão, sendo apresentada na forma

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho_{ar} \vec{v}_{ar}) = 0 \quad (3.9)$$

Em coordenadas cilíndricas tridimensionais têm-se a forma

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_{ar} v_r)}{\partial r} + \frac{(\varepsilon \rho_{ar} v_r)}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\varepsilon \rho_{ar} v_\varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial(\varepsilon \rho_{ar} v_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.10)$$

Substituindo a EQ. (3.8) para as componentes da velocidade na EQ. (3.10), tem-se

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( -K \varepsilon \rho_{ar} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left( -K \varepsilon \rho_{ar} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( -K \varepsilon \rho_{ar} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -K \varepsilon \rho_{ar} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.11)$$

A EQ. (3.11) é não linear e é usada para modelar a distribuição de pressões para o escoamento do ar no interior de um secador cilíndrico. As seguintes condições de contorno são assumidas:

### Análise tridimensional

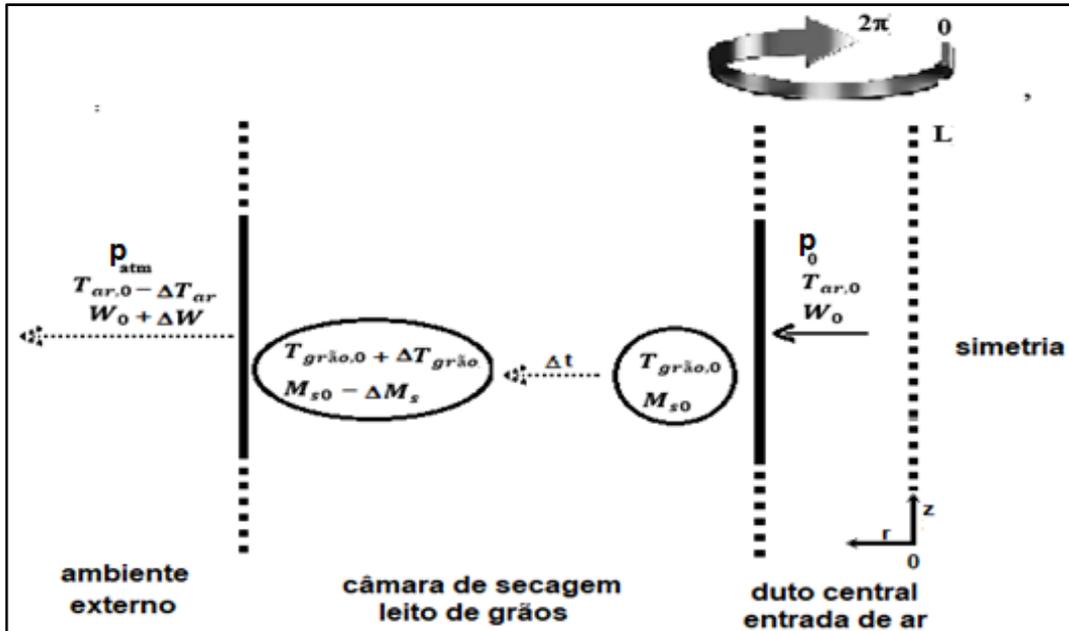
Condição de contorno de Dirichlet para o ar de secagem na entrada (FIG. 3.20):

- $p(r_{int}, \varphi, z) = p_0$ , para  $\forall \varphi \in (0, 2\pi)$  e  $\forall z \in (0, L)$

Condição de contorno de Dirichlet para o ar que sai pelo secador (FIG. 3.20):

- $p(r_{ex}, \varphi, z) = p(r, \varphi, L) = p_{atm}$ , para  $\forall r \in (r_{int}, r_{ext})$ ,  $\forall \varphi \in (0, 2\pi)$  e para  $\forall z \in (0, L)$

FIGURA 3.20 – Esquema para a localização das coordenadas no secador (a) e condições de contorno (b).



FONTE: Próprio autor

Com as condições de contorno anteriores é possível determinar o campo de pressões, e assim solucionar o problema do acoplamento pressão-velocidade. As soluções deste acoplamento são fundamentais para a solução das equações diferenciais que governam a secagem do milho em camada espessa.

### 3.3.2 Modelo para a secagem de grãos em camada espessa

As equações para o modelo matemático usadas nesta tese são originadas do modelo de *Michigan State University* (MSU), cujo os detalhes são apresentados no APENDICE F. As equações obtidas mediante os balanços de massa e energia no ar de secagem e nos grãos (EQ. F.23, F.32 e F.39) foram escritas com as componentes tridimensionais. Para as propriedades: porosidade, massa específica e calor específico do milho, foram usadas as EQ. (4.1), (4.2) e (4.3), respectivamente. Determinadas de forma experimental neste trabalho. Para a equação de balanço de massa nos grãos (F.41) foi utilizado o modelo de Page (EQ. 4.9) com os coeficientes ajustados experimentalmente, conforme descrito no item 4.3 desta tese. As equações para o ar de secagem e para os grãos são dadas por:

a) Equações para o ar de secagem

Para o balanço de energia tem-se

$$\frac{\partial T_{ar}}{\partial t} = \frac{-h a (T_{ar} - T_{gr\tilde{a}o})}{\epsilon \rho_{ar} (c_{p,ar} + c_{p,vapor} W)} - \frac{1}{\epsilon} \left( v_r \frac{\partial T_{ar}}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial T_{ar}}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial T_{ar}}{\partial z} \right) \quad (3.12)$$

Para o balanço de massa tem-se

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon} \left( v_r \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial W}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial W}{\partial z} \right) = - \frac{\rho_{gr\tilde{a}o}}{\epsilon \rho_{ar}} \frac{\partial M_s}{\partial t} \quad (3.13)$$

b) Equações para os grãos

Para o balanço de energia tem-se

$$\frac{\partial T_{gr\tilde{a}o}}{\partial t} = \frac{h a (T_{ar} - T_{gr\tilde{a}o})}{\rho_{gr\tilde{a}o} (1 - \epsilon) (c_{p,gr\tilde{a}o} + c_{p,\acute{a}gua} M_s)} + \frac{h_{lv} + c_{p,vapor} (T_{ar} - T_{gr\tilde{a}o})}{(c_{p,gr\tilde{a}o} + c_{p,\acute{a}gua} M_s)} \frac{\partial M_s}{\partial t} \quad (3.14)$$

Para o balanço de massa tem-se

$$\frac{\partial M_s}{\partial t} \rightarrow \text{Modelo de Page para a camada delgada} \quad (3.15)$$

As equações obtidas para o modelo tridimensional são não lineares e para solucionar utilizando um método numérico as seguintes condições iniciais e de contorno são consideradas (FIG. 3.20):

Condições iniciais:

$$\left. \begin{aligned} &\bullet \quad M_s(r, \varphi, z, 0) = M_{s0}, \\ &\bullet \quad T_{gr\tilde{a}o}(r, \varphi, z, 0) = T_{gr\tilde{a}o,0}, \\ &\bullet \quad W(r, \varphi, z, 0) = W_0, \\ &\bullet \quad T_{ar}(r, \varphi, z, 0) = T_{ar,0} \end{aligned} \right\} \text{ para } \forall r \in (r_{int}, r_{ext}), \forall \varphi \in (0, 2\pi) \text{ e } \forall z \in (0, L)$$

Condições de contorno:

$$\left. \begin{aligned} &\bullet \quad W(r_{int}, \varphi, z, t) = W_{entrada} = W_0, \\ &\bullet \quad T_{ar}(r_{int}, \varphi, z, t) = T_{ar,entrada} = T_{ar,0} \end{aligned} \right\} \text{ para } \forall \varphi \in (0, 2\pi), \forall z \in (0, L) \text{ e } \forall t \in (0, t_{final})$$

### 3.3.3 Modelos para a umidade de equilíbrio e camada delgada

Neste item são apresentados os modelos de teor de umidade de equilíbrio e camada delgada usados na secagem do milho em camada espessa. Os modelos apresentados no QUADRO (2.1) foram ajustados e testados experimentalmente neste trabalho para a camada delgada, uma equação experimental para a umidade de equilíbrio também foi determinada. Os resultados obtidos estão descritos nos itens 4.2 e 4.3. Detalhes do método experimental desenvolvido encontram-se no item 3.2 deste capítulo.

#### a) Modelo para a umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio dos grãos de milho foi determinada experimentalmente nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70°C. Os resultados experimentais obtidos foram ordenados e tratados estatisticamente, objetivando encontrar uma equação que melhor ajuste os dados experimentais do teor de umidade de equilíbrio em função da temperatura de secagem.

As curvas foram analisadas utilizando medidas da dispersão dos pontos de acordo com o método de regressão por mínimos quadrados. Por meio do ajuste da curva foi possível determinar a função que melhor representou a tendência geral dos dados obtidos experimentalmente, e desta forma obter informações quantitativas do fenômeno físico. A análise dos resíduos foi realizada usando o coeficiente de determinação. A equação identificada foi utilizada no modelo de simulação da secagem do milho em camada espessa.

#### b) Modelos analisados para a camada delgada

Para complementar o sistema de equações diferenciais parciais que compõem a secagem dos grãos, foi determinada a equação da cinética da secagem. A forma clássica de resolver o problema é por meio da abordagem empírica, para tanto utilizam-se experimentos de secagem em uma fina camada de grãos, onde as condições do ar de secagem são constantes com o tempo. Os modelos apresentados no QUADRO (2.1) são constituídos por equações não lineares, os mesmos foram testados visando obter a EQ. (3.15).

Os dados experimentais foram ajustados às equações dos modelos e os coeficientes foram estimados pelo método dos mínimos quadrados (SOUZA, 2013). A avaliação do modelo testado foi feita por testes estatísticos de análise de variâncias (ANOVA), testes de P-valor, Fisher e qui-quadrado.

A análise de resíduos foi realizada pelo valor do coeficiente de determinação, enquanto os erros foram interpretados quanto ao erro médio relativo e erro padrão da estimativa (MONTGOMERY e RUNGER, 2009; KUCUK *et al.*, 2014). Estes são os principais parâmetros observados na literatura adotados pelos autores para avaliação dos modelos (HII *et al.*, 2009; YI *et al.*, 2012; CHAYJAN *et al.*, 2011; KUCK *et al.*, 2014; NEJADI e MOHAMMAD, 2016; DOYMAZ, 2017; JIANG *et al.*, 2017; ELGAMAL *et al.*, 2017; PRAKASH e SIEBENMORGEN, 2018).

### 3.3.4 Propriedades físicas do milho

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram avaliados métodos para encontrar a dependência empírica das propriedades massa específica, porosidade e calor específico dos grãos de milho com o teor de umidade. A área específica dos grãos também foi determinada experimentalmente.

#### a) Porosidade do leito ( $\epsilon$ )

A porosidade é a fração de espaço no leito de grãos que não é ocupado pelos grãos. Dinçer e Zamfirescu (2016) e Botelho *et al.* (2018) definem a porosidade absoluta como a razão do volume de espaços vazios ( $V_v$ ) e o volume total ( $V$ ), na forma

$$\epsilon = \frac{V_v}{V} \quad , \text{sendo } \epsilon = f(M_s) \quad (3.17)$$

O efeito do encolhimento dos grãos na secagem promove diferentes variações entre o volume de vazios e o volume total no tempo, estes foram analisados experimentalmente quanto a mudança do teor de umidade dos grãos. Após a análise dos resultados (item 4.1) a EQ. (4.1) foi obtida e usada no modelo de secagem do milho em camada espessa.

#### b) Massa específica ( $\rho_{gr\tilde{a}o}$ )

A massa específica dos grãos de milho é a razão entre a massa e o volume ocupado pelos grãos, em um dado instante durante a secagem, sendo dada como

$$\rho_{gr\tilde{a}o} = \frac{m_u}{V(1 - \epsilon)} \quad , \text{sendo } \rho_{gr\tilde{a}o} = f(M_s) \quad (3.18)$$

A retirada de água causa uma redução na massa dos grãos, entretanto a redução no volume granular pode apresentar proporções diferentes a da massa retirada, causando variações na massa específica do leito de grãos com o teor de umidade. A variação da massa específica real dos grãos é representada pela EQ. (4.2), esta equação foi obtida experimentalmente e usada no modelo de secagem do milho em camada espessa.

c) Calor específico ( $c_{p,grão}$ )

Segundo Zare e Chen (2009) e Ranjbaran *et al.* (2014), o calor específico do milho é dado em função do teor de umidade como

$$c_{p,grão} = a_1 + a_2 M_u , \quad \text{sendo } a_1 \text{ e } a_2 \text{ constantes empíricas} \quad (3.19)$$

Os coeficientes da EQ. (3.19) foram determinados experimentalmente neste trabalho, e foi obtida a EQ. 4.3 que foi usada no modelo de secagem em camada espessa.

d) Área específica ( $a$ )

A área específica superficial dos grãos de milho foi determinada experimentalmente neste trabalho de tese, conforme os dados no item 4.1. Tanto o modelo geométrico do esferóide escaleno triaxial (FIG. 3.18a) quanto do paralelepípedo retângulo (FIG. 3.18b) foram usados para os grãos. Para o caso do esferóide escaleno a área e o volume dos grãos são dados como (MOHSENIN, 1986; OLIVEIRA *et al.*, 2012 e 2014)

$$A_{grão} = \frac{\pi b^2}{2} + \left( \frac{\pi \bar{B} b}{2E} \right) \text{sen}^{-1} E \quad (3.20)$$

$$\text{sendo} \quad b = (\bar{C}\bar{D})^{\frac{1}{2}} \quad \text{e} \quad E = \left( 1 - \left( \frac{b}{\bar{B}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.21)$$

$$V_{grão} = \frac{\pi \bar{B} \bar{C} \bar{D}}{6} \quad (3.22)$$

em que  $\bar{B}$  representa o maior eixo ortogonal do grão,  $\bar{C}$  o eixo médio,  $\bar{D}$  o menor eixo,  $b$  a média geométrica entre o comprimento e a largura, e  $E$  a esfericidade.

Os resultados para os modelos geométricos dos grãos de milho foram confrontados com os dados da literatura. O valor de  $855 \text{ m}^2/\text{m}^3$  obtido usando o modelo do paralelepípedo retângulo foi escolhido para ser usado nas simulações da secagem em camada espessa.

### 3.3.5 Propriedades físicas do ar de secagem e da água

O ar de secagem, a água presente nos grãos e o vapor de água gerado são outros constituintes do sistema de secagem que devem apresentar propriedades físicas conhecidas, ou estimadas experimentalmente. Algumas destas propriedades apresentam um comportamento variável quanto ao nível de umidade e/ou temperatura. Em outros casos, valores fixos serão assumidos e utilizados como parâmetros constantes nas equações do modelo de secagem de grãos de milho.

#### a) Massa específica do ar ( $\rho_{ar}$ )

A variação da massa específica do ar de secagem com a temperatura foi estimada utilizando a equação (RANJBARAN e ZARE, 2012)

$$\rho_{ar} = \frac{p_{atm}}{287 (T_{ar} + 273,16)} \quad (3.23)$$

#### b) Umidade relativa ( $RH$ ) e absoluta do ar ( $W$ )

A umidade relativa é a medida mais conhecida para descrever o conteúdo de água presente no ar. Por definição é dada pela relação (EQ. 3.24) entre a pressão parcial de vapor ( $p_v$ ) devido a quantidade de água existente no ar, e a pressão de saturação ( $p_{vs}$ ) devido a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura.

$$RH = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (3.24)$$

Entretanto, para a solução das equações diferenciais da secagem tem-se interesse na umidade absoluta do ar, definida como a relação da quantidade de água por quantidade de ar seco em um dado volume do ar úmido em análise. A umidade absoluta pode ser estimada conhecendo a umidade relativa do ar usando a relação

$$W = 0,622 \frac{RH p_{vs}}{p_{atm} - (RH p_{vs})} \quad (3.25)$$

A pressão do vapor de saturação no ar de secagem pode ser dada como (BENAMOUN e BELHAMRI, 2008)

$$p_{vs} = p_{atm} \left[ 10^{17,433 - \frac{2795}{T_{ar} + 273,16} - 3,868 \log(T_{ar} + 273,16)} \right] \quad (3.26)$$

A umidade absoluta inicial ( $W_0$ ), condição inicial para o ar de secagem, é calculada pela medida da umidade relativa ( $RH$ ) e da temperatura inicial do ar de secagem ( $T_{ar,0}$ ).

c) Calor específico do ar ( $c_{p,ar}$ )

O calor específico do ar de secagem pode ser representado como um função da temperatura por (LIU *et al.*, 2015)

$$c_{p,ar} = 10^{-3}(1003,4 + 0,178T_{ar}) \quad (3.27)$$

d) Coeficiente convectivo de calor ( $h$ )

Liu *et al.* (2015) analisaram a secagem de milho em leito fixo e utilizaram a equação de Barker para obter o coeficiente convectivo nas simulações. A mesma equação foi usada por Zare e Chen (2009) e Rajbaran *et al.* (2014) nas simulações da secagem de arroz e soja, respectivamente. A equação de Barker foi utilizada neste trabalho e dada como

$$h = 0,2755 c_{p,ar} \rho_{ar} v_{ar} \left( \frac{2 r_0 \rho_{ar} v_{ar}}{\mu} \right)^{-0,34} \quad (3.28)$$

em que  $r_0$  representa o raio equivalente da partícula (igual a 0,008 m para o milho (LIU *et al.*, 2015)),  $v_{ar}$  o módulo da velocidade de escoamento e  $\mu$  a viscosidade do ar. Sendo  $\mu$  representado por (RANJBARAN *et al.*, 2014; GRAY *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2015)

$$\mu = 1,691 \times 10^{-5} + 4,984 \times 10^{-8}T_{ar} - 3,187 \times 10^{-11}T_{ar}^2 + 1,319 \times 10^{-14}T_{ar}^3 \quad (3.29)$$

e) Propriedades para a água líquida e o vapor de água

A retirada de umidade dos grãos de milho ocorre por meio do aquecimento da água pelo ar de secagem, o processo pode ser resumido em três etapas como a seguir.

Na etapa inicial a água líquida presente nos grãos de milho é aquecida até a temperatura de mudança de fase, e a energia necessária pode ser estimada conhecendo o calor específico da água na forma líquida. Para esta etapa é assumido neste trabalho o valor constante de (LIU *et al.*, 2015)

$$c_{p,\acute{a}gua} = 4,2 \times 10^3 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ C} \quad (3.30)$$

Na etapa seguinte a água na fase líquida é evaporada e a energia necessária para a mudança de fase é dada pelo calor latente de vaporização ( $h_{lv}$ ). Esta propriedade pode ser estimada conhecendo a temperatura da água e o teor de umidade presente nos grãos. Neste trabalho a equação usada para  $h_{lv}$  é dada na forma (AMANTÉA *et al.*, 2013)

$$h_{lv} = 3638548 - 4000720M_s - 3529.08T_{ar} \quad (3.31)$$

Na última etapa, o vapor gerado é aquecido e a energia é estimada usando o calor específico do vapor de água ( $c_{p,vapor}$ ). Esta propriedade do vapor é dependente da temperatura do ar de secagem. Neste trabalho a equação usada para  $c_{p,vapor}$  é dada por (LIU *et al.*, 2015)

$$c_{p,vapor} = 10^{-3}(1859,0 + 0,236T_{ar}) \quad (3.32)$$

As etapas anteriores ocorrem de forma contínua até o equilíbrio higroscópico ar-grãos ser alcançado, ou o processo de secagem ser interrompido.

### 3.3.6 Eficiências energéticas e exergéticas

A análise da eficiência de sistemas de secagem é geralmente feita usando equações da termodinâmica. Esta análise usa as equações de equilíbrio para massa, energia, entalpia e entropia para cada subunidade e para o sistema como um todo, permitindo avaliar o desempenho do sistema. Segundo Dinçer e Zamfirescu (2016) estes métodos de análise são apropriados e necessários para fornecer melhores projetos, e soluções ideais para os problemas relacionados à secagem de grãos.

As análises de energia e exergia quando combinadas podem ajudar na identificação de irreversibilidades na secagem. Além disso, podem levar a um sistema com eficiência aprimorada e, portanto, a um consumo de energia reduzido.

A análise exérgica fornece uma melhor contabilização da perda de disponibilidade de calor na secagem, isto favorece o projeto de sistemas de secagem energeticamente mais eficientes. (BALA, 2017; MUJUMDAR, 2007; FORTES e OKOS, 1980).

Amantéa *et al.* (2013) apresentaram expressões para as eficiências energética e exérgica do processo de secagem de grãos, considerando mudanças no espaço e no tempo para os parâmetros de secagem, esta abordagem foi utilizada neste trabalho para o cálculo numérico das eficiências na secagem tridimensional do milho.

A eficiência energética ( $\eta_e$ ) do processo de secagem é definida como

$$\eta_e = \frac{\text{Energia usada para evaporar a água dos grãos}}{\text{Entalpia incorporada no ar de secagem}} \quad (3.33)$$

A equação (3.33) pode ser escrita, matematicamente, usando as propriedades físicas e termodinâmicas da secagem, sendo a eficiência energética entre o tempo  $t$  e  $\Delta t$  dada como (AMANTÉA *et al.*, 2013)

$$\eta_e = \frac{\int_0^t \int_0^x \int_0^y \int_0^z \rho_{gr\tilde{a}o} h_{lv} \frac{\partial M_s}{\partial t} dz dy dx dt}{\rho_{ar} v_{ar} S (c_{p,ar} + c_{p,vapor} W_{ar,amb}) (T_{ar,amb} - T_0) \Delta t} \quad (3.34)$$

em que  $S$  representa a área da seção transversal da entrada de ar,  $W_{ar,amb}$  e  $T_{ar,amb}$  representam, respectivamente, a umidade absoluta e a temperatura do ar ambiente antes do aquecimento, e  $T_0$  a temperatura do ar de secagem aquecido. Na equação de eficiência energética é comum utilizar no numerador apenas a energia necessária para a evaporação da água dos grãos, visto que este é o objetivo maior da secagem, não sendo considerada as energias gastas para aquecimento, seja da água ou dos grãos (BALA, 2017; DINÇER e ZAMFIRESCU, 2015; MUJUMDAR, 2007; FORTES e OKOS, 1980).

A eficiência exérgica ( $\eta_{ex}$ ) do processo de secagem é definida como

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Exérgia usada no processo de evaporação}}{\text{Exérgia que entra no sistema}} \quad (3.35)$$

A equação (3.35) pode ser escrita matematicamente como em Amantéa *et al.* (2013), somando o termo correspondente ao gasto de energia para insuflar o ar pelo ventilador ( $P_{vent}$ ) no denominador, sendo representada como

$$\eta_{ex} = \frac{\int_0^t \int_0^x \int_0^y \int_0^z \rho_{gr\tilde{a}o} h_{lv} \left(1 - \frac{T_{ar,amb}}{T_{ar}}\right) \frac{\partial M_s}{\partial t} dz dy dx dt}{(\rho_{ar} v_{ar} S (c_{p,ar} + c_{p,vapor} W_{ar,amb})(T_{ar,amb} - T_0) + P_{vent}) \Delta t} \quad (3.36)$$

A eficiência exergética pode também ser chamada de exergia ou eficiência de segunda lei. As equações (3.34) e (3.36) foram avaliadas numericamente usando o modelo proposto neste trabalho.

### 3.4 Métodos numéricos para solução de equações diferenciais parciais

As equações governantes para transferência de calor, massa e momentum são representadas por uma expressão matemática que inclui derivadas parciais de uma função multivariada. Na maioria dos casos em questão, as funções são de temperatura  $T(x, y, z, t)$ , umidade absoluta  $W(x, y, z, t)$ , teor de umidade  $M_s(x, y, z, t)$  e velocidade  $v_{ar}(x, y, z, t)$ . Diferentes métodos são usados para a solução da equação de transferência de calor e umidade numericamente, dentre estes destacam: elementos finitos, volumes finitos e diferenças finitas (DINÇER e ZAMFIRESCU, 2016). Neste trabalho o método dos elementos finitos (MEF) foi usado para a solução das equações da secagem.

O princípio do MEF baseia-se na obtenção de uma solução para uma equação diferencial que reduza ao mínimo o erro de aproximação. Após a discretização do problema, a solução obtida deve apresentar-se na forma de uma função variando de uma maneira conhecida entre os valores dos pontos nodais, geralmente na forma quadrática, entretanto, soluções lineares também podem ser obtidas. Os pontos nodais, ou nós, são pontos característicos do elemento, podendo ser vértices, pontos médios dos lados, entre outros. No MEF o domínio de integração é subdividido em um número de elementos de pequenas dimensões, chamados de elementos finitos, que mantém as mesmas propriedades do domínio contínuo. Cada elemento satisfaz as condições das equações integrais resultando em solução conhecida em todo o domínio e não apenas em nós da malha. A função deve conter coeficientes desconhecidos que serão determinados de forma a minimizar o erro na solução. Esses coeficientes devem ser escritos em função dos valores da grandeza em estudo, obtidos para os nós. As funções aproximadas devem ser determinadas utilizando métodos diretos ou iterativos para a solução de sistemas lineares (CHUNG, 2002; BORGES, 2016).

Para encontrar as soluções de equações diferenciais parciais, o MEF foi aplicado usando o *software COMSOL Multiphysics*. Neste *software*, a interface “*mathematics*” pode ser usada para solucionar vários tipos de equações diferenciais parciais (EDP).

As soluções podem ser processadas na interface “*Coefficient Form PDE*”, uma subdivisão da anterior, que produz as soluções de EDP’s na forma de coeficientes. No *COMSOL Multiphysics* a EDP a ser solucionada é definida para uma variável dependente  $u$  na forma

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + a u = f \quad (3.37)$$

Para definir uma EDP especifica-se a variável dependente  $u$  desejada, os coeficientes  $e_a$ ,  $d_a$ ,  $c$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $a$ , além do termo fonte  $f$ . Todos esses termos podem ser funções das coordenadas temporal, espacial ou outros parâmetros definidos pelo usuário.

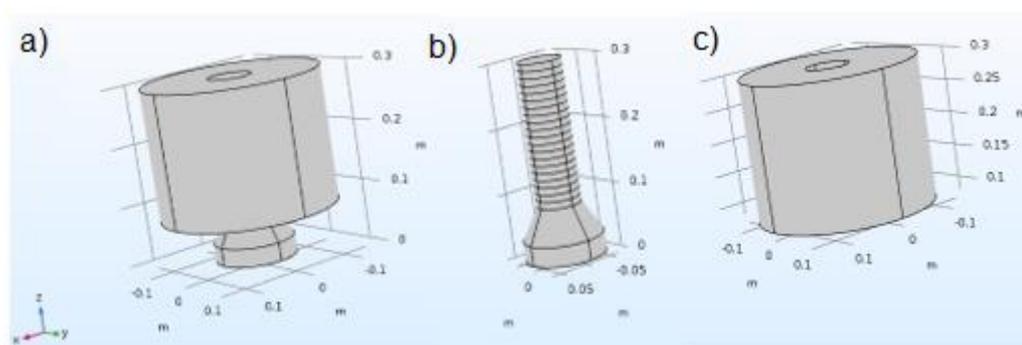
As EQ. (3.12), (3.13) e (3.14) e (3.15) são representadas na forma da EQ. (3.37), e adicionadas as condições iniciais e/ou contorno para obter as soluções possíveis.

### 3.5 Procedimentos para a simulação

As simulações do processo de secagem do milho em camada espessa foram processadas no *software COMSOL Multiphysics*. Neste *software* o método dos elementos finitos (MEF) é usado para computar as soluções numéricas. No próprio ambiente do programa foi construída a geometria e gerada a malha para solução das equações.

Para construção da geometria computacional o sistema de secagem foi dividido em dois grandes domínios (FIG. 3.21), um deles representando o duto central e outro a câmara de secagem de grãos.

FIGURA 3.21 – Domínios para a geometria computacional, (a) visão geral, (b) duto central (domínio-1) e (c) câmara de secagem de grãos (domínio-2).



FONTE: Próprio autor

Para garantir a obtenção de resultados que não variam com a malha, foi realizado o teste de malha segundo o método GCI (*Grid Convergence Index*), os critérios para realização deste teste estão descritos na norma ASME V&V 20-2009. Para tanto três malhas com níveis de refinamentos definidos são escolhidas para avaliar uma ou mais variáveis da simulação, após a análise dos resultados caso os valores não sofram variação a um nível definido na norma ASME (2009), a malha intermediária pode ser usada para resolver o problema com qualidade e menor esforço computacional. O teste de malha foi realizado para as condições do Teste 10 e os resultados são mostrados no item 5.1

O modelo matemático descrito neste presente trabalho foi solucionado utilizando o *software COMSOL Multiphysics*. O modelo composto por sete equações, sendo que duas delas para a distribuição de velocidade e temperatura para o duto central (domínio-1 e outras cinco equações para a distribuição de pressão, umidade e temperatura na câmara de secagem (domínio-2).

As equações no domínio-1 foram solucionadas utilizando o modelo de turbulência “*Realizable k- $\epsilon$* ”, disponível no módulo “*Fluid Flow*” do programa, e o modelo “*Heat Transfer in Fluids*”, disponível no módulo “*Heat Transfer*”. As soluções obtidas para o domínio-1 forneceram os perfis de pressão e temperatura necessários para as condições de contorno e entrada nas equações do domínio-2.

Para solucionar as equações de secagem do milho em camada espessa (EQ. 3.11 a 3.14 e EQ. 4.9) foi usada a interface *COMSOL PDE*. Nesta interface o solucionador é capaz de resolver equações diferenciais parciais com variáveis temporal e espacial. Para tanto, as equações de secagem são acopladas e comparadas com a equação padrão da interface *PDE* (EQ. 3.37). Os valores dos coeficientes são adicionados durante a comparação. Um resumo destes dados é mostrado no QUADRO 3.1.

QUADRO 3.1 –Valores dos coeficientes das equações de secagem na configuração computacional.

VARIÁVEL	$\mathcal{U}$	$e_a$	$d_a$	c	a	$\gamma$
Pressão	p	0	0	$-K \varepsilon \rho_{ar}$	0	0
Temperatura do ar	$T_{ar}$	0	1	0	$\frac{h a}{\varepsilon \rho_{ar} (c_{p,ar} + c_{p,vapor} W)}$	0
Umidade absoluta do ar	W	0	1	0	0	0
Temperatura do grão	$T_{grão}$	0	1	0	$\frac{h a}{\rho_{grão}(1-\varepsilon)(c_{p,grão} + c_{p,água} M_s) + \frac{c_{p,vapor}}{(c_{p,grão} + c_{p,água} M_s)} \frac{\partial M_s}{\partial t}}$	0
Teor de umidade do grão	$M_s$	0	0	0	1	0

VARIÁVEL	$\Phi$	$\beta$	$\alpha$	f
Pressão	p	$-\frac{K \varepsilon \rho_{ar}}{x}$	0	0
Temperatura do ar	$T_{ar}$	$\frac{v_r}{\varepsilon}; \frac{v_\phi}{\varepsilon}; \frac{v_z}{\varepsilon}$	0	$\frac{h a T_{grão}}{\varepsilon \rho_{ar} (c_{p,ar} + c_{p,vapor} W)}$
Umidade absoluta do ar	W	$\frac{v_r}{\varepsilon}; \frac{v_\phi}{\varepsilon}; \frac{v_z}{\varepsilon}$	0	$-\frac{\rho_{grão}}{\varepsilon \rho_{ar}} \frac{\partial M_s}{\partial t}$
Temperatura do grão	$T_{grão}$	0	0	$\frac{h a T_{ar}}{\rho_{grão}(1-\varepsilon)(c_{p,grão} + c_{p,água} M_s) + \frac{h_{lv} + c_{p,vapor} T_{ar}}{(c_{p,grão} + c_{p,água} M_s)} \frac{\partial M_s}{\partial t}}$
Teor de umidade do grão	$M_s$	0	0	$(M_i - M_e)e^{-kt^{0,562}} + M_e$

FONTE: Próprio autor

As equações que representam o processo de simulação da secagem foram resolvidas pela aplicação de um solucionador segregado, sendo aplicado o “*solver PARDISO*” como método de solução, um fator de relaxação de 0,8 e o número de interações como técnica de terminação. Uma tolerância relativa de 0,001 foi usada como critério de convergência.

No QUADRO 3.2 estão listadas as configurações dos parâmetros que não sofrem variação durante a simulação, além das condições iniciais e de contorno.

QUADRO 3.2 – Condições iniciais, de contorno e parâmetros fixos para a simulação.

Propriedade	Teste 10	Teste 11	Teste 12	Teste 13	Teste 14	Teste 15
Altura do leito de milho (m)	0,22					
Potência do ventilador (W)	112					
Velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ )	2,0			4,0		
Temperatura inicial do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )	25,0	25,7	27,8	24,3	24,7	21,8
Temperatura inicial do milho ( $^{\circ}\text{C}$ )	25,0	25,7	27,8	24,3	24,7	21,8
Temperatura de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ )	39,8	50,6	60,0	40,3	50,6	60,5
Teor de umidade inicial do milho - $M_i$ (%bs)	22,15	21,57	21,18	20,31	20,88	20,31
Teor de umidade de equilíbrio - $M_e$ (%bs)	EQ. 4.4					
Pressão do ar na entrada (Pa)	88480	88515	88349	88422	88335	88732
Pressão atmosférica $P_{atm}$ (Pa)	88449	88484	88318	88391	88304	88701
Umidade relativa do ar entrada - $RH$ ( $\text{Pa Pa}^{-1}$ )	0,49	0,47	0,49	0,50	0,47	0,48
Pressão de vapor de saturação - $p_{vs}$ (Pa)	$p_{atm} \left[ 10^{17,433 - \frac{2795}{T_{ar} + 273,16} - 3,868 \log(T_{ar} + 273,16)} \right]$					
Umidade absoluta do ar inicial ( $\text{kg kg}^{-1}$ )	$0,622 \frac{RH P_{vs}}{p_{atm} - (RH p_{vs})}$					
Umidade absoluta do ar na entrada ( $\text{kg kg}^{-1}$ )						
Porosidade inicial do leito (decimal)	$0,3054 + 0,3030M_i$					
Resolução total da malha	173878 elementos					
Taxa de crescimento máxima da malha	1,4					
Fator de curvatura máximo da malha	0,5					
Tolerância de convergência	0,001					
Passo no tempo – incremento (s)	30					
Tempo total de secagem (s)	9000					

FONTE: Próprio autor

As propriedades físicas do milho, ar de secagem e da água, além de outros parâmetros que variam durante a simulação estão resumidos no QUADRO 3.3.

QUADRO 3.3 – Propriedades físicas e parâmetros variáveis para a simulação.

Propriedade	Unidade	Valor/expressão
Milho		
Calor específico (*)	$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$	$c_{p,grão} = 1,5489 + 2,2237M_s$
Massa específica (*)	$kg.m^{-3}$	$\rho_{grão} = 931,30 - 781,12M_s$
Porosidade (*)	<i>decimal</i>	$\epsilon = 0,3054 + 0,3030M_s$
Área específica do milho(*)	$m^2.m^{-3}$	$a = 855$
Raio equivalente do milho (LIU <i>et al.</i> , 2015)	$m$	$r_0 = 0,008$
Condutividade térmica do milho (LIU <i>et al.</i> , 2015)	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$k_t = 0,1614$
Ar de secagem		
Calor específico	$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$c_{p,ar} = 1003,4 + 0,178T_{ar}$
Massa específica	$kg.m^{-3}$	$\rho_{ar} = \frac{P_{atm}}{287(T_{ar} + 273,16)}$
Viscosidade		$\mu = 1,691 \times 10^{-5} + 4,984 \times 10^{-8}T_{ar} - 3,187 \times 10^{-11}T_{ar}^2 + 1,319 \times 10^{-14}T_{ar}^3$
Água		
Calor específico líquido	$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	4200
Calor específico do vapor	$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	$c_{p,vapor} = 1859,0 + 0,236T_{ar}$
Calor latente de valorização	$J.kg^{-1}$	$h_{lv} = 3638548 - 4000720M_s - 3529,08T_{ar}$
Variáveis		
Coefficiente de convecção de calor	$W.m^{-2}.K^{-1}$	$h = 0,2755 c_{p,ar} \rho_{ar} v_{ar} \left( \frac{2 r_0 \rho_{ar} v_{ar}}{\mu} \right)^{-0,34}$
Coefficiente de permeabilidade	$m^3.s.kg^{-1}$	$K = A_s \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right)^2 + \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{(B-1)}{2}}$
Parâmetro da equação de camada delgada (*)	adimensional	$k = e^{0,0186T_{ar}-1,9405}$
Componentes da velocidade do ar	$m.s^{-1}$	$v_r = -K \frac{\partial p}{\partial r} ; v_{\varphi} = -K \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} ; v_z = -K \frac{\partial p}{\partial z}$
Parâmetros da equação de Shedd (*)	adimensional	$A_s = e^{-10,113+12,231M_s+0,027T_{ar}} ;$ $B = 1,315 - 1,722M_s - 0,003T_{ar}$

(\*) As equações destas propriedades/variáveis foram obtidas no item 4.

FONTE: Próprio autor

Além da previsão do comportamento da secagem tridimensional dos grãos de milho na coluna cilíndrica construída, também foi realizada a análise de eficiências energética e exergética ao longo do tempo de secagem, usando o modelo proposto validado. Os parâmetros de secagem, velocidade e temperatura do ar na entrada, foram modificados para analisar as eficiências em diferentes condições de secagem. Nesta etapa, as simulações foram executadas até atingir o teor médio de umidade de 12% para os grãos. Este valor é considerado ideal para a armazenagem do milho por períodos de até 5 anos (BROOKER *et al.*, 1992; ELIAS, 2000; PORTELLA e EICHELBERGER, 2001 e EMBRAPA, 2015).

Foram analisadas as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, e em cada temperatura as velocidades de 0,5; 1,0; 2,0 e 3,0 m.s<sup>-1</sup>, sendo estas as faixas mais comumente utilizadas em trabalhos de secagem (RAJBARAN e ZARE, 2013; AMANTEA *et al.*, 2013; LIU *et al.*, 2015; OKUNOLA *et al.*, 2021; ZADHOSSEIN *et al.*, 2022). O limite superior de temperatura foi estabelecido segundo Brooker *et al.* (1992), e o limite superior de velocidade segundo as condições de não fluidização de Kunii e Levenspiel (1991). As demais condições de secagem foram mantidas constantes e consideradas as especificações do Teste 10 (QUADRO 3.2).

Uma análise mais representativa foi realizada pela simulação do processo de secagem do milho em um secador com dimensões maiores. Sendo este constituído por uma geometria 10 vezes maior ao secador de menores dimensões projetado neste trabalho. Os detalhes das configurações modificadas estão mostrados no QUADRO 3.4.

QUADRO 3.4 – Configurações do secador de médio porte considerado para a simulação computacional da secagem do milho.

Propriedade	Valor
Diâmetro externo (m)	2,9
Diâmetro interno (m)	0,72
Altura total (m)	3,0
Altura do leito de milho (m)	2,2
Potência do ventilador (W)	1120
Velocidade do ar (m s <sup>-1</sup> )	Ver item 5.4
Temperatura inicial do ar (°C)	25,0
Temperatura inicial do milho (°C)	25,0
Temperatura de secagem (°C)	Ver item 5.4
Teor de umidade inicial do milho - $M_i$ (%bs)	22,15
Teor de umidade de equilíbrio - $M_e$ (%bs)	Eq. 4.4
Pressão do ar na entrada (Pa)	91471
Pressão atmosférica $p_{atm}$ (Pa)	91440
Umidade relativa do ar entrada - $RH$ (Pa Pa <sup>-1</sup> )	0,49
Resolução total da malha	Ver item 5.4
Taxa de crescimento máxima da malha	Ver item 5.4
Fator de curvatura máximo da malha	Ver item 5.4
Tolerância de convergência	0,001
Passo no tempo – incremento (s)	600
Tempo total de secagem (s)	54000

As simulações foram executadas em dois computadores com capacidades de processamento distintas. Um computador portátil convencional (computador 1) foi utilizado para a realização das simulações para malhas com aproximadamente 100 mil elementos. Para resoluções superiores foi necessário utilizar um outro (computador 2) com capacidade de memória adicional, este último disponível no Laboratório GAMSET do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. As configurações destes são dadas como

- Computador 1: Intel(R) Core (TM) i7-4500U CPU @ 1.80GHz 2.40 GHz  
16GB RAM – HD 1 TB – Sistema operacional WINDOWS 10 HOME – Notebook particular.
- Computador 2: Intel(R) Core (TM) i7-4500U CPU @ 1.80GHz 2.40 GHz  
48GB RAM – HD 2 TB – Sistema operacional WINDOWS 10 PRO– Desktop UFMG.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos realizados para o processo de secagem do milho, segundo os procedimentos descritos na metodologia. Nas seções seguintes são mostrados os resultados para as propriedades físicas, umidade de equilíbrio, secagens em camada delgada e camada espessa para o milho.

### 4.1 Resultados para as propriedades físicas do milho

A variação das propriedades físicas do milho em relação ao teor de umidade foi analisada. Os resultados para a porosidade, massa específica e calor específico foram obtidos para quatro valores distintos do teor de umidade do milho. Também foi calculado o valor da área específica dos grãos.

Os dados médios obtidos experimentalmente estão dispostos na TAB. 4.1 e no APÊNDICE E. As análises da variação das propriedades em função do teor de umidade do grão são mostradas no FIG. 4.1.

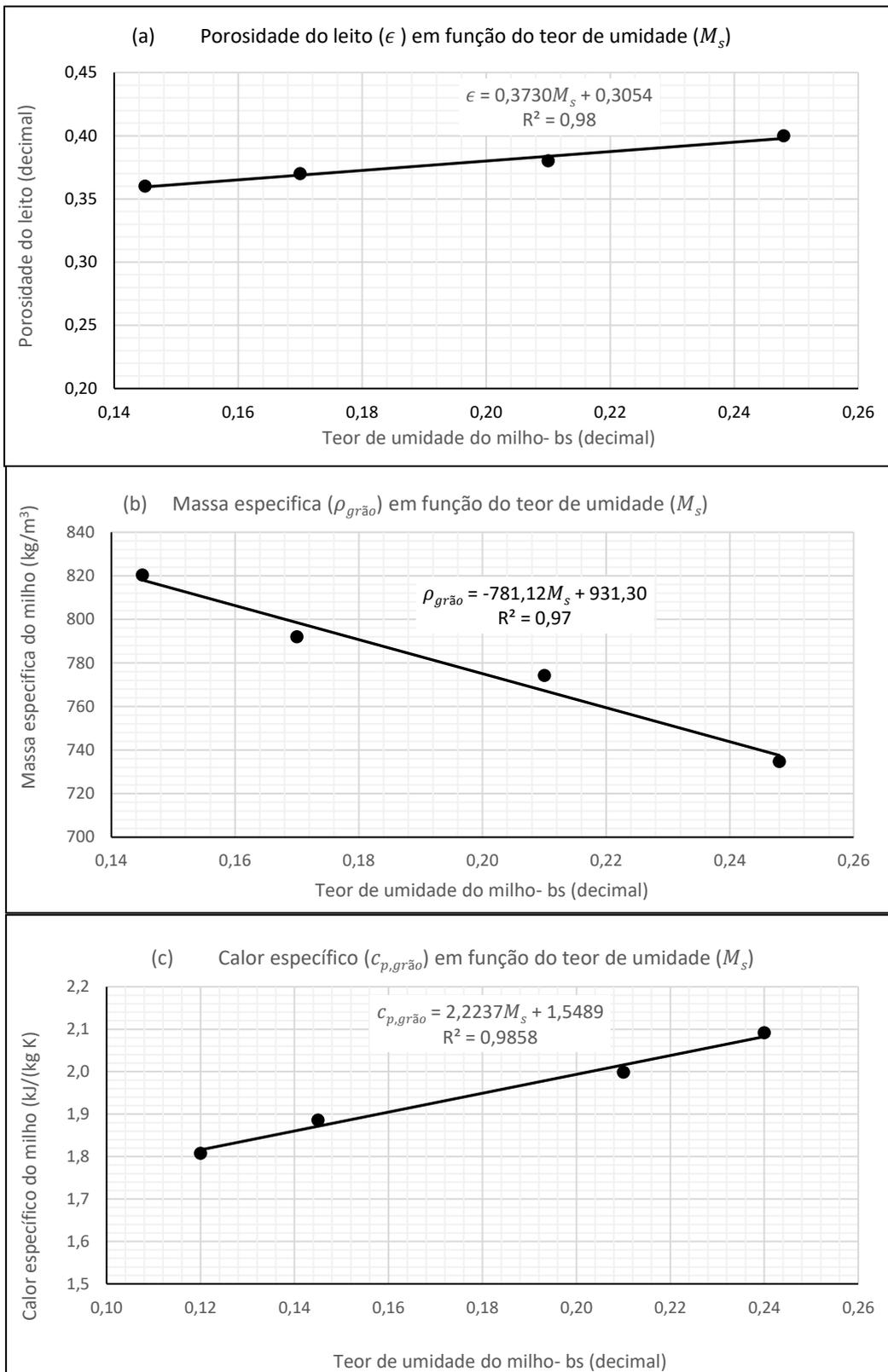
TABELA 4.1 – Valores médios para as propriedades físicas do milho obtidos experimentalmente para cada teor de umidade do grão disponível para análise.

Teor de umidade do grão - bs (decimal)	Porosidade (decimal)	Massa específica (kg.m <sup>-3</sup> )	Teor de umidade do grão - bs (decimal)	Calor específico (kJ.kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )
0,248 ± 0,002	0,40 ± 0,01	738,74 ± 7,76	0,120 ± 0,003	1,81 ± 0,18
0,210 ± 0,002	0,38 ± 0,01	772,94 ± 5,61	0,145 ± 0,003	1,89 ± 0,13
0,170 ± 0,002	0,37 ± 0,01	794,69 ± 4,21	0,210 ± 0,002	2,00 ± 0,09
0,145 ± 0,003	0,36 ± 0,01	788,37 ± 7,43	0,240 ± 0,002	2,09 ± 0,05

FONTE: Próprio autor

De acordo com os trabalhos de secagem de produtos agrícolas publicados em diversos períodos (BALA, 2017; LIU *et al.*, 2015; RAJBARAN *et al.*, 2014; ZARE e CHEN, 2009 e BROOKER *et al.*, 1992), as propriedades físicas dos grãos apresentam um comportamento linear em relação à variação do teor de umidade. Como pode ser visto no FIG. 4.1, este mesmo comportamento é observado para os resultados da regressão linear obtidos neste trabalho. A qualidade dos resultados foi medida pelo coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) dos testes, sendo 0,97 o menor valor encontrado, demonstrando assim uma boa linearidade para os dados das propriedades físicas testadas.

FIGURA 4.1 – Curvas de linearidade para as propriedades físicas médias do milho determinadas experimentalmente. (a) Porosidade, (b) massa específica e (c) calor específico



FONTE: Próprio autor

Após o ajuste dos dados experimentais aos modelos de regressão, as equações para a porosidade, massa específica e calor específico do milho usadas no modelo de secagem em camada espessa são, respectivamente:

$$\epsilon = 0,3054 + 0,3030M_s \quad (4.1)$$

$$\rho_{gr\tilde{a}o} = 931,30 - 781,12M_s \quad (4.2)$$

$$c_{p,gr\tilde{a}o} = 1,5489 + 2,2237M_s \quad (4.3)$$

Os resultados para a determinação experimental da área específica dos grãos de milho estão dispostos em tabelas no APÊNDICE E. Foram obtidos dois valores de acordo com a geometria do grão utilizada (FIG. 3.18), sendo  $855 \text{ m}^2/\text{m}^3$  para a geometria retangular e  $1010 \text{ m}^2/\text{m}^3$  para a esferoidal. Os dois valores obtidos foram testados nas simulações, e não foi observada nenhuma diferença nos resultados. Desta forma, o valor de  $855 \text{ m}^2/\text{m}^3$  foi selecionado para executar as simulações computacionais, uma vez que valores muito próximos a este foram usados com frequência em outras simulações para a secagem de grãos (LIU *et al.*, 2015; RAJBARAN *et al.*, 2014 e ZARE e CHEN, 2009).

As incertezas associadas às equações ajustadas foram calculadas usando a ferramenta “Análise de Dados – Regressão” do *Microsoft Excel*®. Para a porosidade, massa específica e calor específico as incertezas foram de 0,0066;  $13,20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  e  $0,1145 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , respectivamente. Para as medidas de área específica a incerteza foi de 7%.

#### 4.2 Resultados para a umidade de equilíbrio

Os resultados experimentais para a umidade de equilíbrio obtidos nesta etapa, foram utilizados para a obtenção de uma equação que melhor ajusta o conjunto de dados à uma função. Para isto o método dos mínimos quadrados foi utilizado. Os dados foram obtidos considerando a umidade relativa ambiente entre 50 e 60%, e as temperaturas de secagem de 30, 40, 50, 60 e 70°C. Em cada temperatura o experimento foi realizado duas vezes (duplicata).

Os dados para o teor de umidade de equilíbrio do milho nas temperaturas consideradas encontram-se na TAB. 4.2. As incertezas foram estimadas considerando as medições e fórmulas de expansão. Os resultados foram gerados no *Microsoft Excel*®.

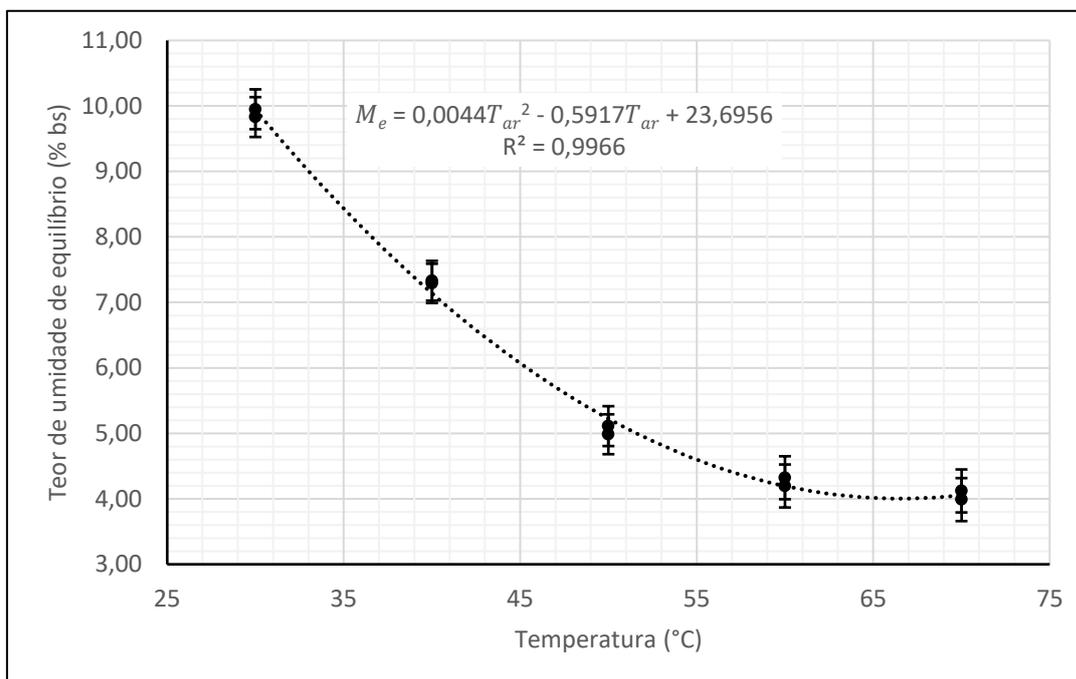
TABELA 4.2 – Valores médios para as propriedades físicas do milho obtidos experimentalmente para cada teor de umidade do grão disponível.

Temperatura (°C)	Teor de umidade de equilíbrio $-M_e$ (% bs)		Temperatura (°C)	Teor de umidade de equilíbrio $-M_e$ (% bs)
30	$9,95 \pm 0,30$		50	$5,11 \pm 0,30$
30	$9,84 \pm 0,30$		60	$4,32 \pm 0,33$
40	$7,33 \pm 0,30$		60	$4,20 \pm 0,33$
40	$7,29 \pm 0,30$		70	$4,12 \pm 0,33$
50	$4,99 \pm 0,30$		70	$3,99 \pm 0,33$

FONTE: Próprio autor

O FIG. 4.2 apresenta o ajuste dos dados experimentais à uma curva de tendência, tendo a temperatura como a variável independente. Observa-se que uma função polinomial de ordem dois ajusta muito bem os dados, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,997. No FIG. 4.2 também são mostradas as barras de erros em cada medida experimental, sendo a curva de tendência sempre compreendida entre os intervalos de erro. A curva mostra uma diminuição da umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura, entretanto, para temperaturas superiores a 60°C a queda é mais suave. Este comportamento é característico para as curvas de teor de umidade de equilíbrio, e observado em outros trabalhos de pesquisa (KINGSLY e ILELEJI, 2009; SMANIOTTO, 2012; VITÁZEK e HAVELKA, 2014; LIU *et al.*, 2015; LE-XIU *et al.*, 2016).

FIGURA 4.2 – Curva de ajuste dos dados experimentais para o teor de umidade de equilíbrio dos grãos de milho.



FONTE: Próprio autor

A EQ. 4.4 encontrada foi escolhida para estimar o teor de umidade de equilíbrio do milho, considerando as condições de secagem deste trabalho. Esta equação também foi utilizada nas simulações da secagem do milho em camada espessa.

$$M_e = 0,0044 T_{ar}^2 - 0,5917 T_{ar} + 23,6956 \quad (4.4)$$

Os resultados deste item mostraram uma maneira de obter o comportamento do teor de umidade de equilíbrio em diversas temperaturas para os grãos de milho, considerando a faixa de 50 a 60% para a umidade absoluta do ar. A incerteza associada à equação ajustada foi calculada usando a análise de variâncias (ANOVA) e o Microsoft Excel. Para a EQ. 4.4 a incerteza encontrada foi de 0,1473 %.

### 4.3 Resultados para a secagem em camada delgada

Os resultados experimentais da secagem do milho em camada delgada para as condições consideradas são mostrados na TAB. 4.3. O teor de umidade final do milho ficou entre 16,70 e 12,15 % (bs).

TABELA 4.3 – Valores médios do teor de umidade dos grãos e razão de umidade obtidos experimentalmente em cada teste em camada delgada

Tempo de secagem (min)	Teor de umidade do leito, M <sub>s</sub> (%bs)								
	Teste 01	Teste 02	Teste 03	Teste 04	Teste 05	Teste 06	Teste 07	Teste 08	Teste 09
0	22,59	20,54	22,59	20,54	20,54	20,54	20,54	20,54	20,54
10	20,97	18,66	20,13	19,24	18,61	18,18	19,23	18,58	18,04
20	20,28	17,64	18,90	18,65	17,93	17,17	18,65	17,87	16,98
30	19,79	17,01	18,06	18,17	17,25	16,40	18,17	17,24	16,30
40	19,40	16,38	17,37	17,78	16,71	15,82	17,78	16,77	15,72
50	19,00	15,90	16,73	17,44	16,33	15,19	17,44	16,29	15,15
60	18,71	15,46	16,24	17,20	15,89	14,76	17,20	15,95	14,81
70	18,42	15,13	15,80	16,96	15,45	14,37	16,96	15,62	14,37
80	18,17	14,69	15,35	16,76	15,21	13,99	16,76	15,28	13,99
90	17,88	14,45	15,01	16,47	14,97	13,70	16,47	15,04	13,70
100	17,73	14,16	14,71	16,28	14,73	13,36	16,28	14,76	13,41
110	17,43	13,87	14,32	16,08	14,49	13,12	16,08	14,56	13,17
120	17,24	13,58	14,08	15,84	14,24	12,83	15,84	14,33	12,88
130	17,04	13,34	13,83	15,70	14,05	12,59	15,70	14,09	12,69
140	16,90	13,09	13,53	15,55	13,86	12,35	15,55	13,89	12,49
150	16,70	12,90	13,29	15,41	13,66	12,15	15,40	13,75	12,30

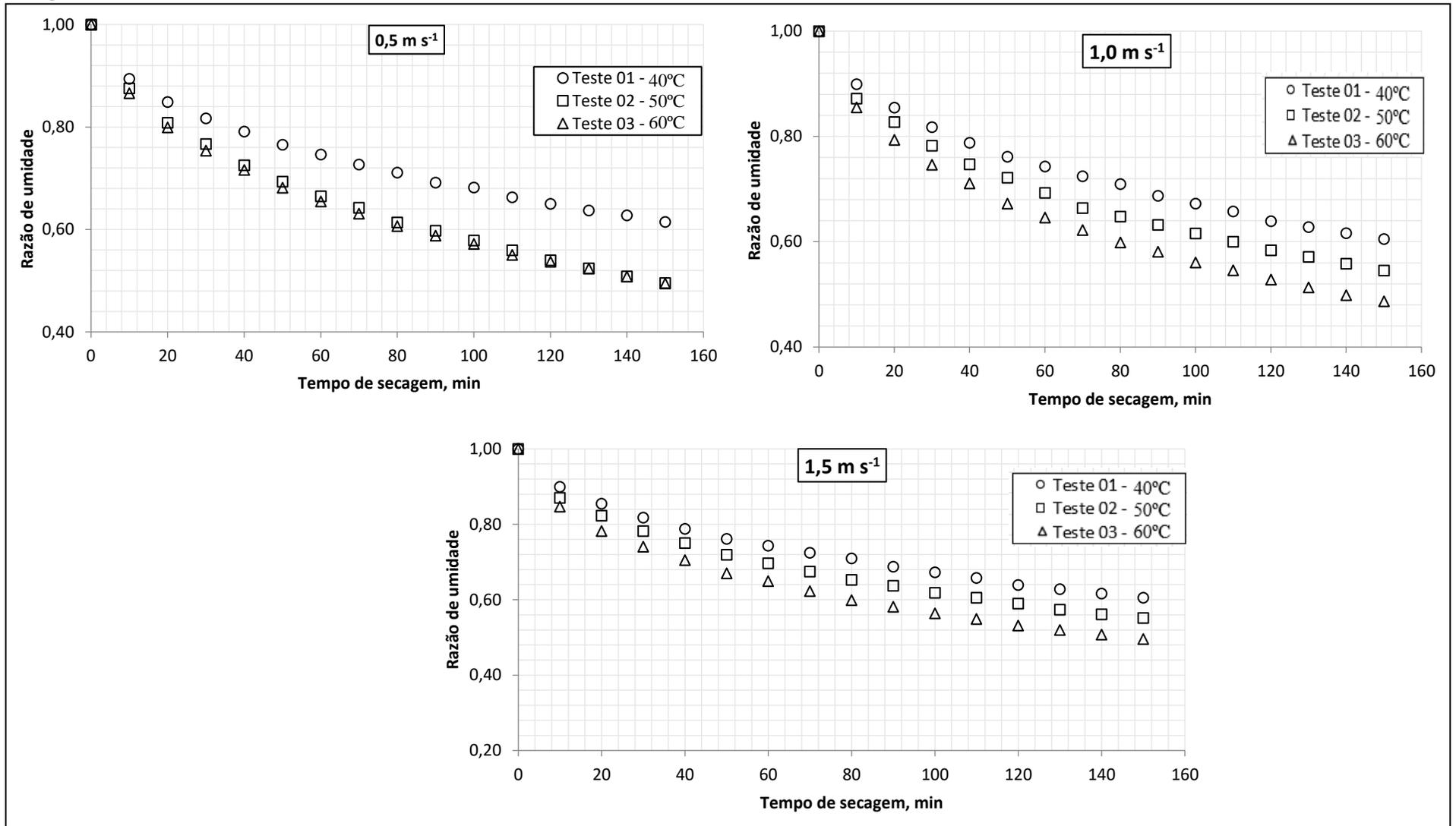
Tempo de secagem (min)	Razão de umidade, MR								
	Teste 01	Teste 02	Teste 03	Teste 04	Teste 05	Teste 06	Teste 07	Teste 08	Teste 09
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
10	0,894	0,875	0,866	0,899	0,872	0,855	0,899	0,871	0,847
20	0,849	0,808	0,799	0,855	0,827	0,794	0,855	0,823	0,782
30	0,817	0,767	0,754	0,818	0,782	0,746	0,818	0,782	0,741
40	0,791	0,725	0,716	0,788	0,747	0,711	0,788	0,751	0,705
50	0,766	0,693	0,682	0,762	0,722	0,673	0,762	0,719	0,670
60	0,746	0,665	0,655	0,743	0,693	0,646	0,743	0,697	0,649
70	0,727	0,642	0,631	0,725	0,664	0,622	0,724	0,675	0,623
80	0,711	0,614	0,607	0,710	0,648	0,599	0,710	0,653	0,599
90	0,692	0,598	0,588	0,687	0,632	0,581	0,687	0,637	0,581
100	0,682	0,578	0,572	0,672	0,616	0,561	0,672	0,618	0,564
110	0,663	0,559	0,551	0,658	0,600	0,546	0,657	0,605	0,549
120	0,650	0,540	0,537	0,639	0,584	0,528	0,639	0,589	0,531
130	0,637	0,524	0,524	0,628	0,571	0,513	0,628	0,574	0,519
140	0,627	0,508	0,508	0,617	0,558	0,499	0,616	0,561	0,508
150	0,615	0,495	0,494	0,605	0,546	0,487	0,605	0,552	0,496

FONTE: Próprio autor

As condições de realização de cada teste podem ser encontradas na metodologia, e a definição de razão de umidade na EQ. (2.5). As incertezas nas medições foram adequadamente identificadas e estimadas de forma quantitativa, considerando todos os ciclos de medições e fontes de incertezas. Os resultados gerados no Microsoft Excel® e EES mostraram incertezas de  $\pm 0,05$  % (bs) para o teor de umidade, e  $\pm 0,004$  para a razão de umidade. Observou-se que, nos experimentos realizados em uma mesma velocidade ocorreu uma redução na razão de umidade com o aumento da temperatura. Isto ocorreu devido ao aumento da taxa de energia fornecida ao leito pelos resistores. Esta observação foi mais acentuada na secagem em velocidade mais baixa ( $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ ). Não foram observadas modificações significativas no teor de umidade com o aumento da velocidade de escoamento em uma mesma temperatura. Apesar disto, a velocidade de escoamento é uma variável importante no deslocamento da frente de secagem.

Os dados para a razão de umidade em cada tempo de secagem são mostrados no FIG. 4.3 para cada velocidade do ar insuflado. Observa-se uma curva com comportamento exponencial durante todo o tempo de secagem considerado. Este comportamento é típico das curvas de secagem, e demonstra um controle do processo por fenômenos convectivos de calor e massa na superfície do grão, tal como descrito no item 2.2.1.2 da revisão bibliográfica.

FIGURA 4.3 – Razão de umidade para a secagem do milho em camada delgada em diferentes velocidades de escoamento e temperaturas do ar de secagem.



FONTE: Próprio autor

Os resultados obtidos pelos modelos de secagem em camada delgada foram confrontados com os experimentais, visando identificar o melhor modelo que represente o fenômeno. Para tanto, foram utilizados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro padrão da estimativa (SE) e o erro médio relativo (P) como parâmetros estatísticos para a seleção do modelo. Modelos de melhor qualidade apresentam valores elevados para  $R^2$  e mais baixos para os demais parâmetros, estes são dados como

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})(MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre}))^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2} \quad (4.5)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{GLM}} \quad (4.6)$$

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MR_{exp,i} - MR_{pre,i}|}{MR_{exp,i}} \quad (4.7)$$

em que  $MR_{exp,i}$  e  $\overline{MR}_{exp}$  representam as razões de umidade experimentais instantânea e média, respectivamente.  $MR_{pre,i}$  e  $\overline{MR}_{pre}$  representam as razões de umidade previstas pelo modelo instantânea e média, respectivamente, e  $GLM$  os graus de liberdade do modelo (número de medições experimentais menos o número de parâmetros considerados no modelo).

Na TAB. 4.4 encontram-se os parâmetros estatísticos calculados para cada modelo de cinética da secagem do milho. Estes foram analisados segundo diferentes temperaturas e velocidades do ar. Os dados dispostos apresentam a previsão dos modelos sem e com ajuste aos dados experimentais obtidos em camada delgada. Os dados sem ajuste foram obtidos utilizando os parâmetros das equações coletados na literatura. O ajuste dos coeficientes de cada modelo foi realizado utilizando a função “*SOLVER*” do *Microsoft Excel*®, que realiza a regressão não linear dos dados e otimiza o valor dos coeficientes pela minimização dos erros.

TABELA 4.4 – Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio relativo (P, %) e erro padrão da estimativa (SE) para os modelos de cinética da secagem analisados, com e sem ajuste aos dados experimentais

Parâmetros estatísticos para os modelos sem ajuste										
Modelo	Temp. do ar (°C)	$R^2$			SE			P		
		0,5 m s <sup>-1</sup>	1,0 m s <sup>-1</sup>	1,5 m s <sup>-1</sup>	0,5 m s <sup>-1</sup>	1,0 m s <sup>-1</sup>	1,5 m s <sup>-1</sup>	0,5 m s <sup>-1</sup>	1,0 m s <sup>-1</sup>	1,5 m s <sup>-1</sup>
Lewis (Oliveira <i>et al.</i> , 2012) <sup>1</sup>	40	0,938	0,951	0,956	0,055	0,046	0,061	5,8	5,2	7,2
	50	0,941	0,937	0,941	0,129	0,071	0,056	19,2	8,2	6,5
	60	0,927	0,930	0,922	0,137	0,111	0,086	20,4	16,1	10,6
Brooker (Le-Xiu <i>et al.</i> , 2016) <sup>1</sup>	40	0,915	0,968	0,923	0,139	0,392	0,145	17,1	48,9	18,0
	50	0,916	0,906	0,905	0,230	0,195	0,191	33,4	26,6	26,0
	60	0,900	0,897	0,882	0,236	0,244	0,242	34,7	36,5	36,1
Thompson (Bala, 2017) <sup>1</sup>	40	0,997	0,998	0,998	0,032	0,036	0,037	4,0	4,7	4,7
	50	0,998	0,996	0,996	0,094	0,059	0,056	13,8	8,2	7,7
	60	0,996	0,995	0,990	0,037	0,045	0,046	5,3	6,7	6,5
Page (Le-Xiu <i>et al.</i> , 2016) <sup>1</sup>	40	0,985	0,988	0,988	0,160	0,166	0,166	20,2	21,0	21,1
	50	0,986	0,981	0,981	0,253	0,218	0,214	37,1	30,1	29,5
	60	0,979	0,977	0,969	0,259	0,268	0,266	38,5	40,3	40,0
Midilli (Chayjan <i>et al.</i> , 2011) <sup>1</sup>	40	0,907	0,917	0,917	0,170	0,175	0,175	20,0	20,8	20,8
	50	0,909	0,898	0,897	0,269	0,232	0,228	36,6	29,7	29,1
	60	0,892	0,889	0,873	0,276	0,285	0,284	38,0	39,8	39,5
Overhults (Souza, 2013) <sup>1</sup>	40	0,995	0,997	0,997	0,098	0,104	0,104	12,4	13,2	13,2
	50	0,997	0,994	0,994	0,165	0,130	0,127	24,2	18,0	17,5
	60	0,994	0,993	0,989	0,145	0,154	0,152	21,6	23,2	22,9
Parâmetros estatísticos para os modelos com ajuste										
Modelo	Temp. do ar (°C)	$R^2$			SE			P		
		0,5 m s <sup>-1</sup>	1,0 m s <sup>-1</sup>	1,5 m s <sup>-1</sup>	0,5 m s <sup>-1</sup>	1,0 m s <sup>-1</sup>	1,5 m s <sup>-1</sup>	0,5 m s <sup>-1</sup>	1,0 m s <sup>-1</sup>	1,5 m s <sup>-1</sup>
Lewis	40	0,942	0,951	0,951	0,048	0,045	0,045	5,3	5,0	5,0
	50	0,957	0,944	0,942	0,053	0,055	0,055	6,7	6,6	6,6
	60	0,946	0,945	0,932	0,058	0,061	0,066	7,5	7,9	8,5
Brooker	40	0,935	0,944	0,944	0,028	0,027	0,027	2,5	2,4	2,4
	50	0,949	0,935	0,933	0,033	0,034	0,034	3,5	3,3	3,2
	60	0,937	0,934	0,920	0,037	0,038	0,041	3,9	4,1	4,2
Thompson	40	0,998	0,996	0,996	0,006	0,010	0,010	0,7	1,1	1,1
	50	0,993	0,997	0,998	0,017	0,010	0,008	1,9	1,0	0,9
	60	0,997	0,997	0,999	0,012	0,011	0,005	1,3	1,2	0,6
Page	40	1,000	1,000	1,000	0,002	0,002	0,002	0,2	0,2	0,2
	50	1,000	0,999	1,000	0,002	0,003	0,002	0,3	0,3	0,2
	60	1,000	1,000	1,000	0,003	0,002	0,002	0,3	0,2	0,3
Midilli	40	1,000	1,000	1,000	0,002	0,002	0,002	0,2	0,2	0,2
	50	1,000	1,000	1,000	0,002	0,003	0,002	0,3	0,3	0,2
	60	1,000	1,000	1,000	0,002	0,002	0,002	0,2	0,1	0,2
Overhults	40	1,000	1,000	1,000	0,002	0,002	0,002	0,2	0,2	0,2
	50	1,000	0,999	1,000	0,002	0,003	0,002	0,3	0,3	0,2
	60	1,000	1,000	1,000	0,003	0,002	0,002	0,3	0,2	0,3

<sup>1</sup> Referências para coleta dos valores dos parâmetros das equações dos modelos sem ajuste.

FONTE: Próprio autor

Os resultados dos modelos sem o ajuste mostraram-se satisfatórios em relação ao coeficiente de determinação, sendo obtidos valores entre 0,882 e 0,997. Entretanto, com erros médios relativos elevados, variando entre 4 e 40%. Após o ajuste observou-se uma significativa melhoria em todos os parâmetros, obtendo um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mínimo de 0,920 e máximo de 1,000. Os modelos de Page, Midilli e Overhults apresentaram valores de  $R^2$  iguais a 1,000 para quase todos os testes. Entretanto, a maior contribuição deste ajuste ocorreu na redução dos erros padrão e médio (SE e P). Foram obtidos valores de P inferiores a 8% para todos os testes, e abaixo de 1% para os modelos de Page, Midilli e Overhults. Com relação a SE, todos os modelos apresentaram valores muito baixos, com destaque novamente para os modelos de Page, Midilli e Overhults, com valores muito próximos de zero. Estes resultados mostraram que os modelos apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais.

A adequabilidade dos modelos de cinética de secagem aos conjuntos de dados experimentais, foi analisada utilizando o teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ) de aderência. Para tanto, os valores de  $\chi^2$  foram calculados (EQ. 4.8) para cada modelo, em cada condição de secagem, e comparado ao valor crítico, ao nível de 0,05 de significância.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{GLM} \quad (4.8)$$

Na TAB. 4.5 são apresentados os valores calculados para o teste qui-quadrado, os valores críticos e o p-valor obtidos da distribuição estatística. Observa-se que, em todos os modelos os valores de qui-quadrado foram muito pequenos e inferiores ao valor crítico, além de apresentar p-valor igual a um ( $P = 1,000$ ) em todos os testes. Desta forma, com  $P > 0,05$  e os valores de  $\chi^2$  calculados não pertencerem a região dos valores críticos, pode-se afirmar, ao nível de significância de 5%, que a distância entre os valores de razão de umidade previstos pelos modelos e obtidos experimentalmente é muito pequena em todos os modelos analisados, ou seja, os modelos se aplicam aos resultados dos experimentos. Os modelos de Page, Midilli e Overhults destacaram-se novamente, sendo obtidos valores de  $\chi^2$  cerca de 1000 vezes menor em relação aos outros modelos. É importante citar que quanto menor o valor de  $\chi^2$  melhor será o ajuste do modelo aos dados experimentais (KUCUK *et al.*, 2014).

TABELA 4.5 – Valores para o teste qui-quadrado calculados para os modelos em análise, valores críticos e p-valor para a distribuição estatística utilizada.

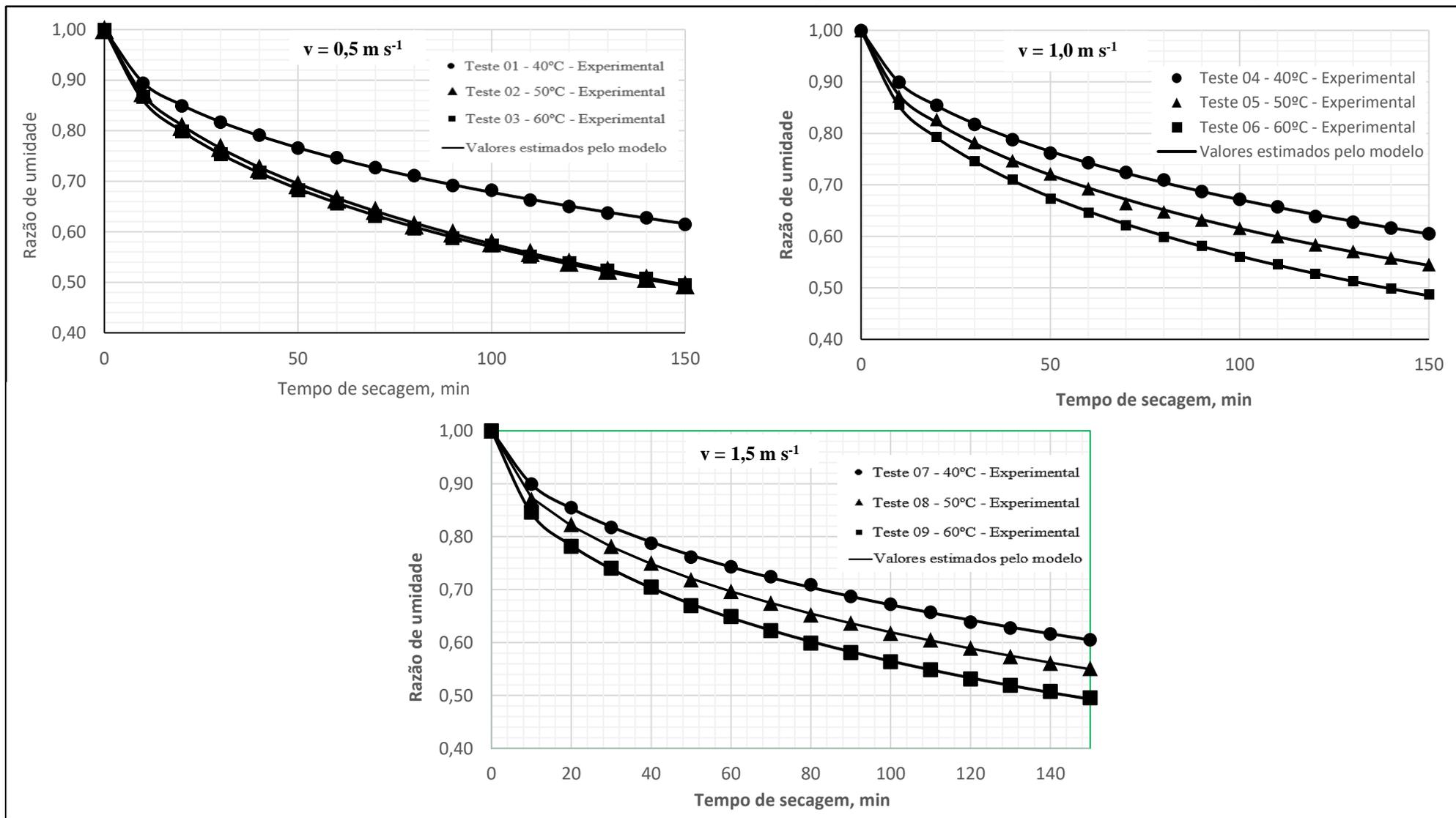
Modelo	Temperatura do ar (°C)	$\chi^2 (x 10^{-3})$			$\chi^2$ crítico ( $\alpha = 0,05$ )	P-valor ( $\alpha = 0,05$ )
		0,5 m s <sup>-1</sup>	1,0 m s <sup>-1</sup>	1,5 m s <sup>-1</sup>		
Lewis	40	2,293	2,054	2,055	24,996	1,000
	50	2,783	2,972	3,044		
	60	3,407	3,675	4,324		
Brooker	40	0,804	0,747	0,748	23,685	1,000
	50	1,117	1,137	1,128		
	60	1,379	1,462	1,680		
Thompson	40	0,038	0,099	0,099	23,685	1,000
	50	0,275	0,091	0,059		
	60	0,146	0,114	0,028		
Page	40	0,003	0,005	0,005	23,685	1,000
	50	0,005	0,010	0,003		
	60	0,007	0,004	0,004		
Midilli	40	0,003	0,006	0,006	21,026	1,000
	50	0,005	0,010	0,003		
	60	0,003	0,002	0,004		
Overhults	40	0,003	0,005	0,005	23,685	1,000
	50	0,005	0,010	0,003		
	60	0,007	0,004	0,004		

FONTE: Próprio autor

A análise dos parâmetros estatísticos mostra que todos os modelos testados podem ser utilizados para representar a cinética da secagem do milho. Entretanto, os modelos sem ajuste são limitados devido a elevados erros. Os modelos com ajuste mostraram maior qualidade, e melhores resultados são obtidos com os modelos de Page, Midilli e Overhults. Desta forma, o modelo de Page ajustado foi selecionado para compor as equações do estudo da secagem do milho neste trabalho, em função dele apresentar um número menor de parâmetros em relação aos demais de mesma qualidade.

No FIG. 4.4 são mostradas as curvas da cinética da secagem dos grãos de milho estimadas pelo modelo de Page ajustado. Os resultados são mostrados para as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem. Verifica-se um ajuste muito elevado e satisfatório aos dados experimentais para todas as condições de secagem, uma vez que  $R^2 = 1,000$  para quase todos os testes.

FIGURA 4.4 - Valores da razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page, obtidos para a secagem do milho em diferentes velocidade e temperatura de secagem.



FONTE: Próprio autor

Na TAB. 4.6 são mostrados os valores dos parâmetros da equação do modelo de Page ajustados ao experimento. Para a analisar a dependência dos parâmetros com a temperatura e velocidade, foi usado a análise de variâncias (ANOVA), realizada segundo a função “ANÁLISE DE DADOS” do Microsoft Excel®. Os dados deste teste encontram-se no APÊNDICE D. Para todos os testes assumiu-se um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05.

TABELA 4.6 – Valores dos parâmetros do modelo de Page ajustado aos dados experimentais.

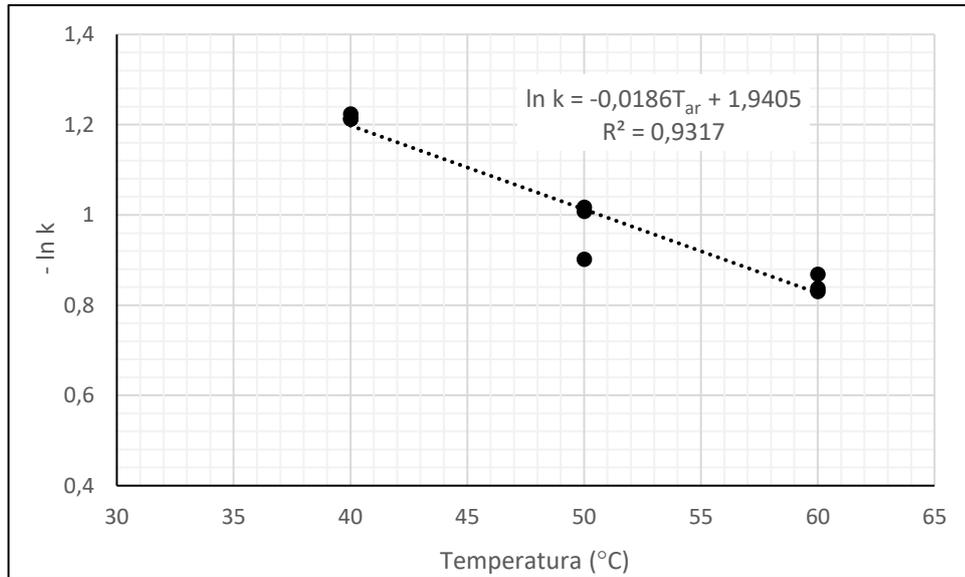
Valor de n	Valor de k	Temperatura (°C)	Velocidade (m.s <sup>-1</sup> )
0,545	0,294	40	0,50
0,601	0,406	50	0,50
0,570	0,420	60	0,50
0,573	0,297	40	1,00
0,559	0,365	50	1,00
0,562	0,433	60	1,00
0,573	0,297	40	1,50
0,549	0,362	50	1,50
0,528	0,436	60	1,50
Média: 0,562±0,021	Equação para o parâmetro k: $\ln k = 0,0186 \cdot T_{ar} - 1,9405$		

FONTE: Próprio autor

Para o parâmetro  $\underline{k}$  o teste F de significância global mostrou  $F < 0,05$ , indicando que há evidências estatísticas que pelo menos uma das variáveis (temperatura e/ou velocidade) está relacionada com o valor de  $\underline{k}$ . O teste de significância individual apresentou p-valor  $< 0,05$  para a interseção da curva e para a variável temperatura, e um p-valor  $> 0,05$  para a variável velocidade do ar. Isto indica que há evidências estatísticas da relação entre o valor de  $\underline{k}$  e a temperatura. Enquanto nenhuma evidência é observada para a velocidade. A ANOVA para o parâmetro  $\underline{n}$  mostrou p-valor  $> 0,05$  para os testes de significância global e individual, para ambas as variáveis. Desta forma, não há evidências de relação dos valores de  $\underline{n}$  com a temperatura ou velocidade do ar na secagem.

A equação para o parâmetro  $\underline{k}$  foi determinada por regressão linear dos dados (FIG. 4.5). Para  $\underline{n}$  foi usado o valor médio. Ambos os parâmetros são mostrados na TAB. 4.6.

FIGURA 4.5 – Curva de regressão linear para o parâmetro k do modelo de Page.



FONTE: Próprio autor

Desta forma, a equação para a cinética da secagem do milho em camada delgada a ser utilizada na simulação em camada espessa para a coluna de secagem cilíndrica, é dada como

$$MR = \frac{(M_s - M_e)}{(M_i - M_e)} = e^{-kt^{0,562}} \quad ; \quad k = e^{0,0186T_{ar} - 1,9405} \quad (4.9)$$

ou na forma diferencial como

$$\frac{\partial M_s}{\partial t} = (-0,562 k t^{-0,438})(M_i - M_e) e^{-kt^{0,562}} \quad (4.10)$$

A EQ. (4.10) foi descrita na seção 3.3.2 apenas como uma equação geral de camada delgada (EQ. 3.15). Aqui é descrita de forma completa para simulação em camada espessa.

#### 4.4 Resultados para os parâmetros da equação de Shedd

Para calcular os parâmetros  $A_s$  e  $B$  da equação de Shedd foram usados os dados experimentais obtidos por Abou-El-Hana e Younis (2008). Estes são mostrados na TAB. 4.7.

TABELA 4.7 – Queda de pressão ( $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ ) em coluna de milho para diferentes valores de velocidade de escoamento, temperatura do ar e teor de umidade do grão.

Velocidade de escoamento do ar ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Temperatura do ar (K)											
	313,16 (40°C)				323,16 (50°C)				333,16 (60°C)			
	Teor de umidade do grão (bs)											
	16	19	22	25	16	19	22	25	16	19	22	25
<b>0,08</b>	152	137	118	103	147	128	113	93	137	118	93	74
<b>0,16</b>	314	299	275	240	299	284	245	216	230	206	186	172
<b>0,24</b>	535	505	481	451	515	495	461	414	490	461	432	402

FONTE: Abou-El-Hana e Younis, 2008, pag. 949.

A análise foi realizada por regressão linear (ANOVA) de forma similar ao item anterior. A avaliação das equações foi feita usando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o desvio médio relativo (P). Todos os resultados e testes estão dispostos em tabelas no APÊNDICE D. Após os testes foram encontradas as equações dos parâmetros a serem utilizadas na simulação da secagem do milho em camada espessa, essas são dadas como

$$A_s = e^{-10,113+12,231M_s+0,027T_{ar}} \quad (4.11)$$

$$B = 1,315 - 1,722M_s - 0,003T_{ar} \quad (4.12)$$

As equações anteriores apresentaram um coeficiente de determinação igual a 0,99 e um desvio médio relativo de 4,86%. Esses valores mostram um ajuste satisfatório para as equações aos dados experimentais obtidos por Abou-El-Hana e Younis (2008).

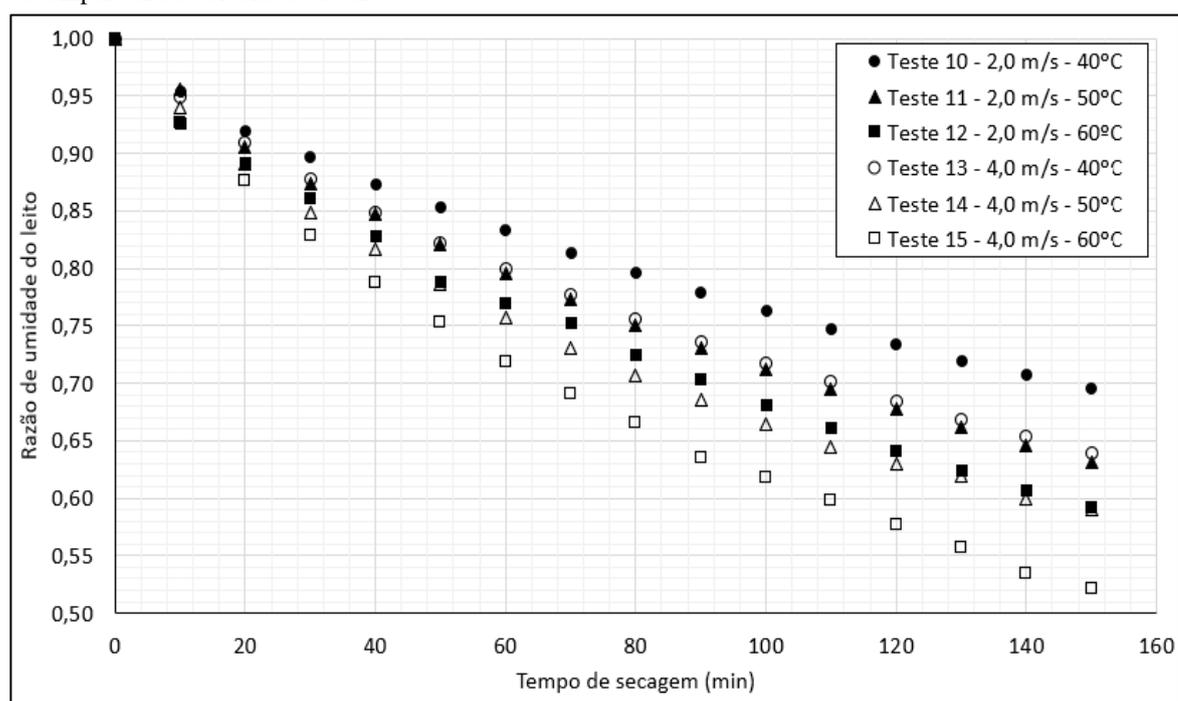
#### 4.5 Resultados para a secagem em camada espessa

Os experimentos de secagem em camada espessa foram realizados segundo descrito nas TAB. 3.2, 3.3 e 3.4. Os valores experimentais obtidos para o teor médio de umidade e razão de umidade para a secagem do milho em coluna cilíndrica com admissão radial do ar, são mostrados no APÊNDICE E. Estes dados foram obtidos realizando pesagens sucessivas do leito de grãos como um todo.

As incertezas nas medições do teor médio de umidade e razão de umidade foram de  $\pm 0,09$  % (bs) e  $\pm 0,01$  (decimal), respectivamente. Os cálculos foram realizados de maneira similar ao item 4.3. Valores de umidade de aproximadamente 13 e 14% (bs) foram obtidos para os testes 12, 14 e 15. Segundo a TAB. 2.1 estes níveis são adequados para o armazenamento do milho por períodos de até dois anos. Já para os testes 10, 11 e 13, os níveis de umidade obtidos sugerem um menor tempo de armazenamento para o milho. Sendo necessário um tempo de secagem um pouco superior ao testado para obter níveis mais baixos.

Para uma melhor interpretação dos resultados, os dados de teor de umidade foram transformados em razão de umidade, visto que os níveis de umidade iniciais foram distintos em cada teste. Os dados de razão de umidade são mostrados no FIG. 4.6 para todos os testes de secagem.

FIGURA 4.6 – Razão de umidade para a secagem do milho em camada espessa em diferentes condições de temperatura e velocidade do ar.



FONTE: Próprio autor

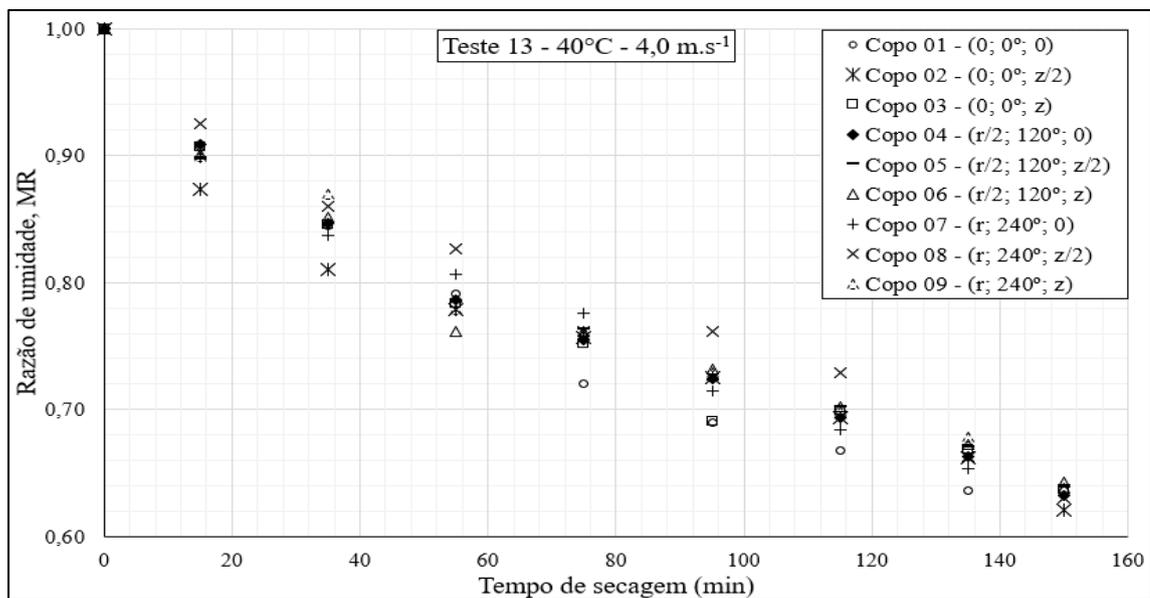
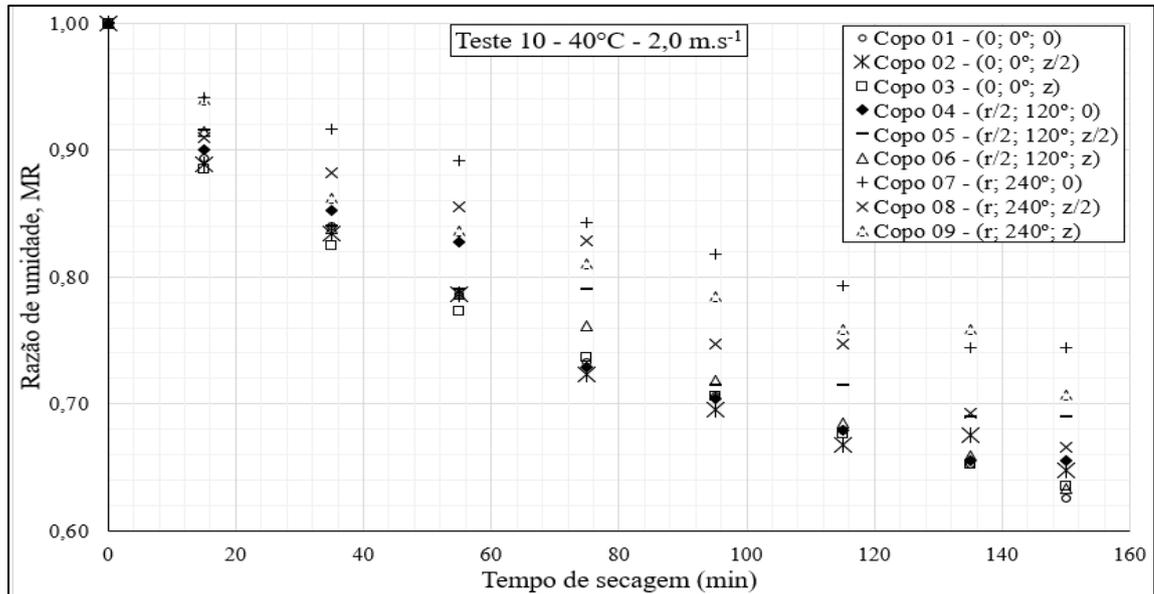
Como mostrado no FIG. 4.6 os valores de razão de umidade foram menores para temperaturas de secagem maiores, considerando uma mesma velocidade. Isto ocorreu devido ao aumento da quantidade de calor disponibilizado ao ar de secagem. Para uma mesma temperatura e diferente valor de velocidade, foi observado uma redução da razão de umidade com o aumento da velocidade. Tal fato está relacionado ao maior deslocamento da zona de secagem (FIG. 2.10) no interior do leito de grãos.

O teor de umidade também foi analisado em diferentes posições dentro do leito. Para tanto, foram feitas medidas de perda de massa dos copos posicionados segundo a TAB. 3.4. Os dados obtidos para o teor de umidade ao longo do tempo para os copos são mostrados no APÊNDICE E. As incertezas nas medidas de massa e teor de umidade para os copos foram de  $\pm 0,1$  g e  $\pm 0,50$  % (bs), respectivamente. Foram obtidos teores de umidade entre 13 e 15% (bs) para a secagem nas temperaturas de 50 e 60°C, e entre 16 e 17% (bs) para a temperatura de 40°C. O tempo total de secagem foi de 150 minutos. Desta forma, para a secagem em temperatura mais baixa o produto deve permanecer por um tempo maior no secador, visando obter níveis mais adequados para a conservação.

A razão de umidade também foi usada para analisar a retirada de água dos copos, visto que os teores de umidade iniciais não foram iguais para os testes. Desta forma, mesmo mantendo uma diferença inferior a 2% entre os teores iniciais de umidade em cada teste, a razão de umidade ainda é o melhor parâmetro para interpretar o fenômeno de secagem (KUCUK *et al.*, 2014; BALA, 2017).

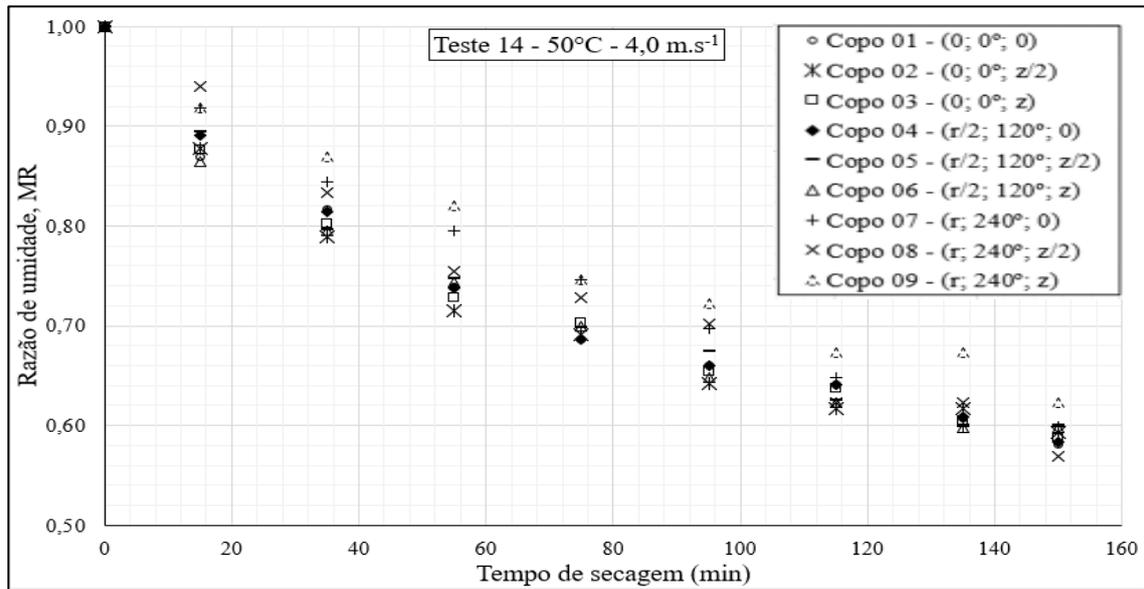
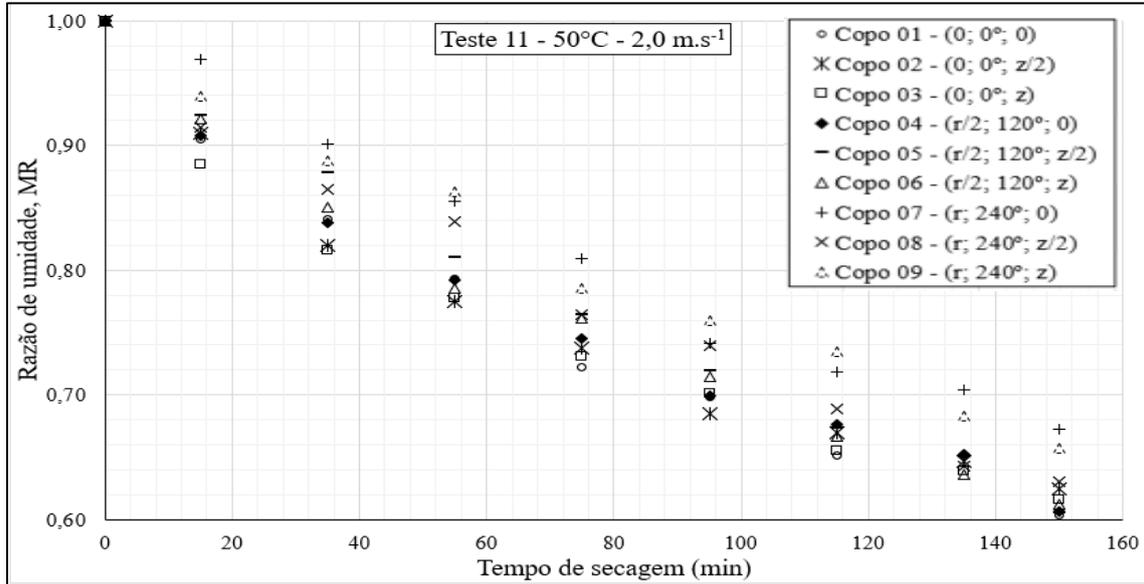
Nos FIG. 4.7, 4.8 e 4.9 são mostradas as razões de umidade em todos os copos para cada teste de secagem, as respectivas condições de realização do experimento e a posição dos copos no leito de milho. Em todos os testes realizados observou-se um produto mais seco nas posições mais próximas do duto central (copos 01, 02 e 03), secagem intermediária nas posições centrais no secador (copos 04, 05 e 06) e menor secagem nas posições mais distantes do duto (copos 07, 08 e 09). Em geral, para uma mesma posição radial e azimutal os copos localizados mais no topo (03, 06 e 09) apresentaram menor secagem em relação aos localizados em posições inferiores. Isto pode decorrer de uma distribuição não uniforme do ar no interior do duto central, e uma perda de carga no escoamento axial. A influência da temperatura na secagem foi observada ao comparar os testes realizados em uma mesma velocidade. Para os testes realizados a  $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ , foram retirados entre 20 e 35 % de umidade na temperatura de 40°C (teste 10), de 35 a 40% em 50°C (teste 11) e de 35 a 50% para 60°C (teste 12). Para os testes realizados a  $4,0 \text{ m.s}^{-1}$ , foram retirados entre 35 e 40 % de umidade na temperatura de 40°C (teste 13), de 40 a 45% em 50°C (teste 14) e de 45 a 50% para 60°C (teste 15). Isto é, ocorreu um aumento no incremento de retirada de umidade em no mínimo 5% para a menor velocidade, e de 10% para a maior. Este aumento na retirada de umidade em temperaturas maiores ocorre devido a um maior fornecimento de energia para a frente de secagem. Isto aumentou a difusão da água do interior do grão para a superfície, e assim favoreceu a evaporação.

FIGURA 4.7 – Dados para a razão de umidade em todos os copos obtidos nas condições de secagem dos testes 10 e 13.



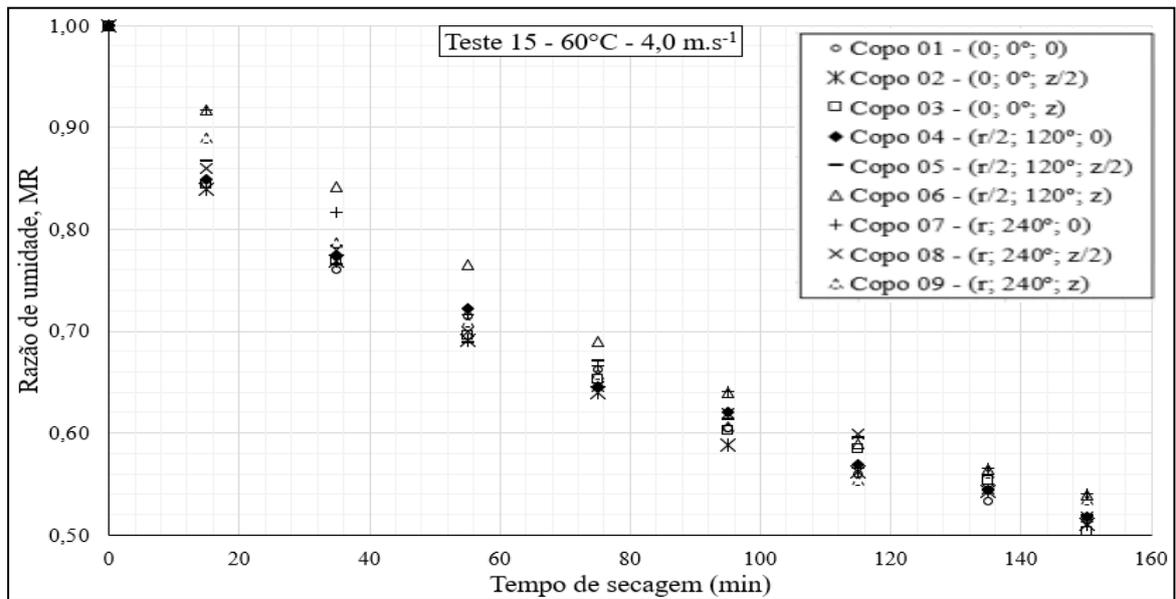
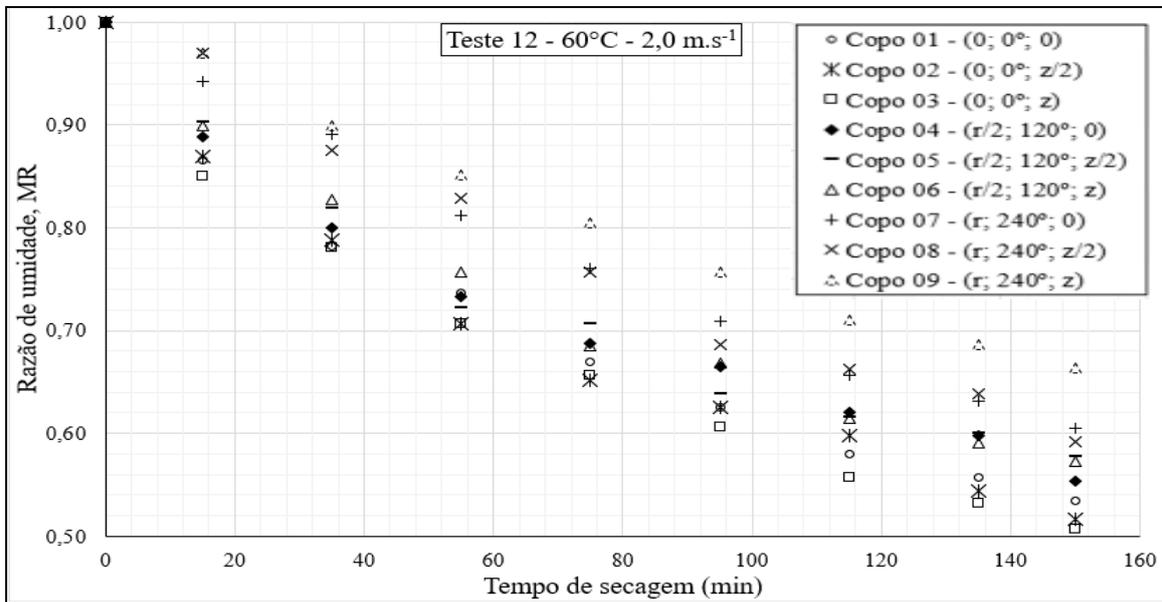
FONTE: Próprio autor

FIGURA 4.8 – Dados para a razão de umidade em todos os copos obtidos nas condições de secagem dos testes 11 e 14.



FONTE: Próprio autor

FIGURA 4.9 – Dados para a razão de umidade em todos os copos obtidos nas condições de secagem dos testes 12 e 15.



FONTE: Próprio autor.

Nos FIG. 4.7 a 4.9 também pode-se analisar a influência da velocidade do ar insuflado na secagem do milho, considerando as velocidades de  $2,0 \text{ m.s}^{-1}$  e  $4,0 \text{ m.s}^{-1}$ . A incerteza nas medições de velocidade foi de  $\pm 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ . Além de proporcionar um aumento de até 10% no incremento de retirada de água dos copos em velocidade mais alta, observou-se ainda uma redução significativa no conteúdo de umidade para os copos localizados em posições mais distantes do duto central de ar (07, 08 e 09). Isto está relacionado ao deslocamento mais rápido da frente de secagem na direção radial da coluna cilíndrica, e um aumento no coeficiente de convecção de calor. Desta forma, desprezar o gradiente de velocidade durante a secagem pode ocasionar erros e falhas no modelo matemático.

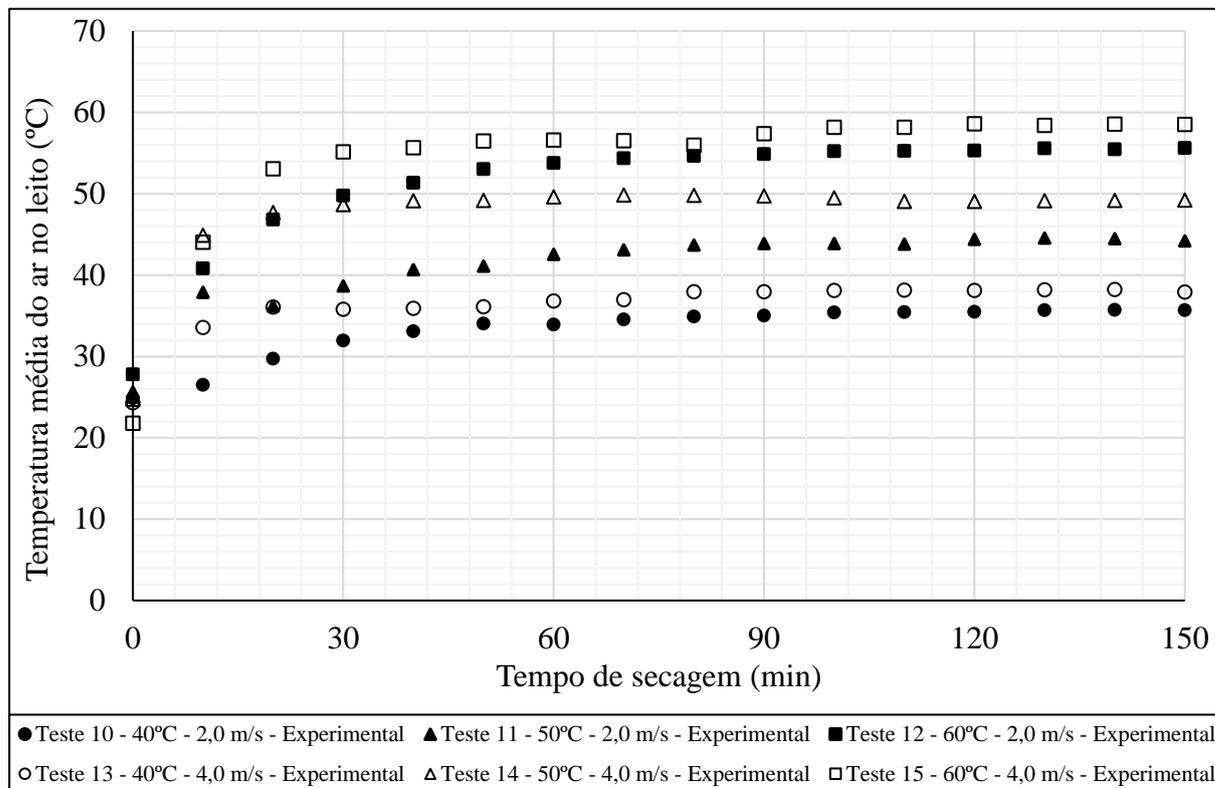
De uma forma geral, observa-se que para os copos mais próximos do duto, um aumento na temperatura melhora a retirada de umidade em aproximadamente 15%. Enquanto uma mudança de velocidade tem um efeito pouco significativo. Entretanto, em posições mais distantes do duto o efeito é mais significativo, causando a retirada de uma quantidade maior de umidade, sendo mais acentuado em posições mais superiores ( $z/2$  e  $z$ ).

A análise do perfil de temperaturas no leito de grãos ao longo do tempo de secagem, foi realizada por meio dos FIG. 4.10 a 4.13. Para tanto, nove termopares foram distribuídos em posições distintas no interior do secador, segundo a TAB. 3.3. As temperaturas foram registradas para os testes 10, 11, 12, 13, 14 e 15.

A variação da temperatura média do leito de grãos com o tempo é mostrada no FIG. 4.10 para os testes experimentais realizados. Todas as curvas apresentaram um comportamento similar, com uma elevação mais intensa da temperatura nos instantes iniciais, seguida por uma diminuição da variação da temperatura. Isto já era esperado, visto que este perfil é tipicamente encontrado em trabalhos de secagem (BALA, 2017).

Observou-se que em todos os testes a temperatura média do leito ficou abaixo da temperatura do ar quente na entrada. Isto ocorreu devido nem toda a energia fornecida pelo ar ser usada para aquecer o leito de grãos, uma outra parte foi usada para evaporar a umidade presente nos grãos de milho. Assim, durante a fase inicial toda a energia é usada para aquecer o grão e ocorre um rápido aumento da temperatura do leito. Quando se inicia o processo de evaporação da água não há aumento significativo na temperatura, observando uma quase estabilização da mesma. Com o fim do processo de retirada da água livre a temperatura do grão tende a igualar com a do ar quente de secagem, neste momento o processo de secagem atinge o equilíbrio higroscópico.

FIGURA 4.10 – Dados para a temperatura média do ar no leito de grãos obtidos em todos os testes.



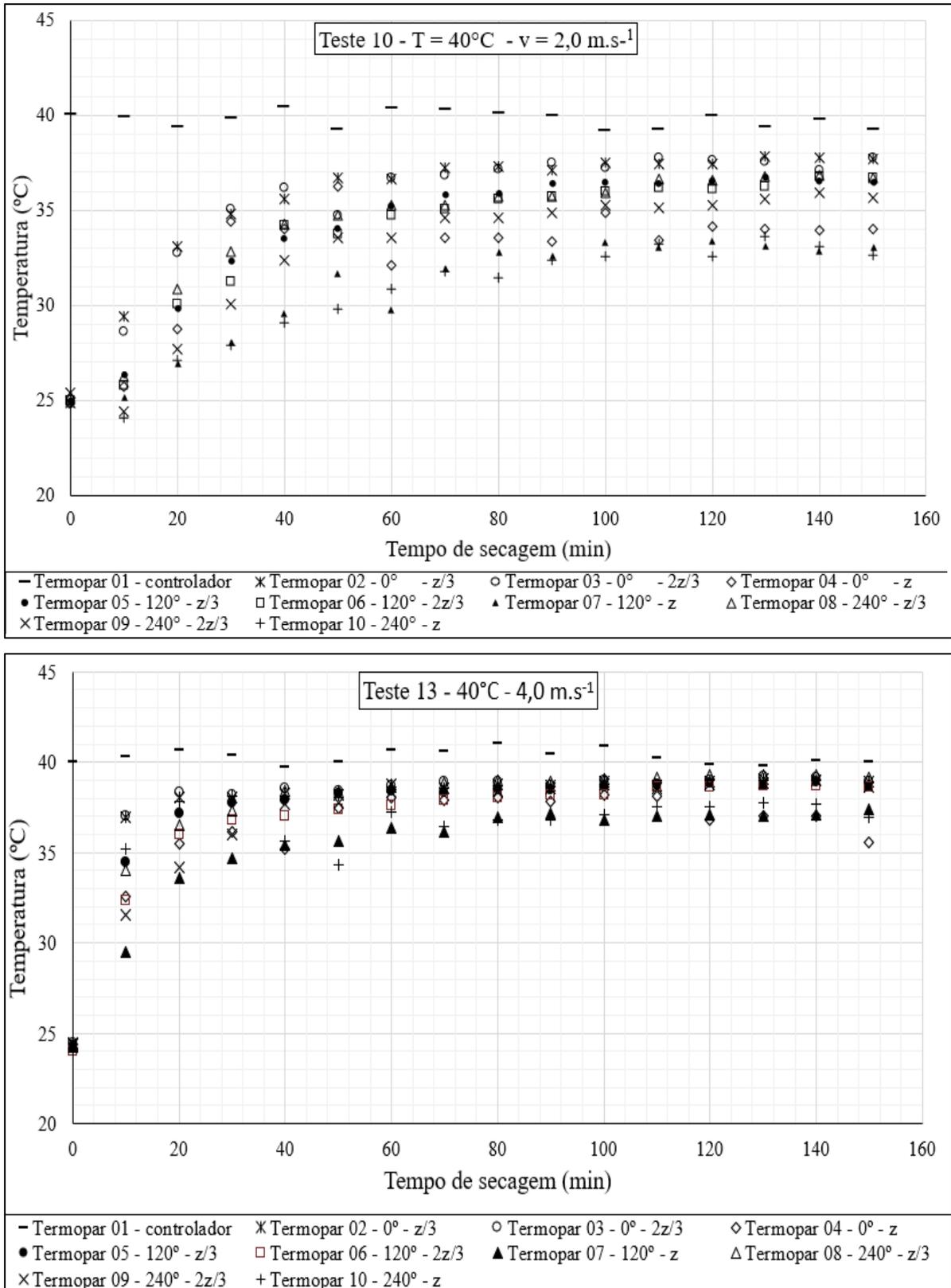
FONTE: Próprio autor.

Ainda é observado no GRA 4.10 que o aumento na temperatura do ar de secagem para os testes causou um aumento na temperatura do leito de grãos, e uma correspondente redução na razão de umidade (FIG. 4.6). Para os testes realizados na mesma temperatura e velocidades diferentes (10 e 13; 11 e 14; 12 e 15), observa-se que o leito de grãos atinge temperaturas mais elevadas na maior velocidade. Isto ocasionou menores razões de umidade para o leito (FIG. 4.6), levando a tempos de secagem menores até o nível de umidade desejado. Apesar do Teste 12 (60°C e 2,0 m.s<sup>-1</sup>) atingir uma maior temperatura média do leito, o mesmo apresentou razões de umidade pouco superiores ao Teste 14 (50°C e 4,0 m.s<sup>-1</sup>), mostrando uma influência positiva da velocidade no tempo de secagem dos grãos. Estas observações também ocorreram entre os testes 11 (50°C e 2,0 m.s<sup>-1</sup>) e 13 (40°C e 4,0 m.s<sup>-1</sup>), isto pode estar relacionado a uma distribuição mais eficiente de energia ao longo do leito em velocidades mais altas.

Nos FIG. 4.11, 4.12 e 4.13 são mostrados os perfis de temperatura obtidos para todos os termopares em cada teste individual. Observa-se que os termopares localizados na coordenada azimutal  $0^\circ$  (02, 03 e 04) apresentaram maiores temperaturas, e muito pouco ou nenhuma distinção quanto à altura. Os termopares localizados em  $120^\circ$  (05, 06 e 07) apresentaram menores temperaturas em relação a  $0^\circ$ , e um comportamento similar quanto à altura. Os termopares localizados a  $240^\circ$  apresentaram as menores temperaturas e uma distinção quanto à altura. Comparando a secagem do milho para uma mesma temperatura e velocidades de 2,0 e 4,0  $\text{m.s}^{-1}$ , em uma maior velocidade todos os termopares tem uma maior elevação da temperatura, chegando a valores mais próximos ao termopar controlador ao final do tempo de secagem.

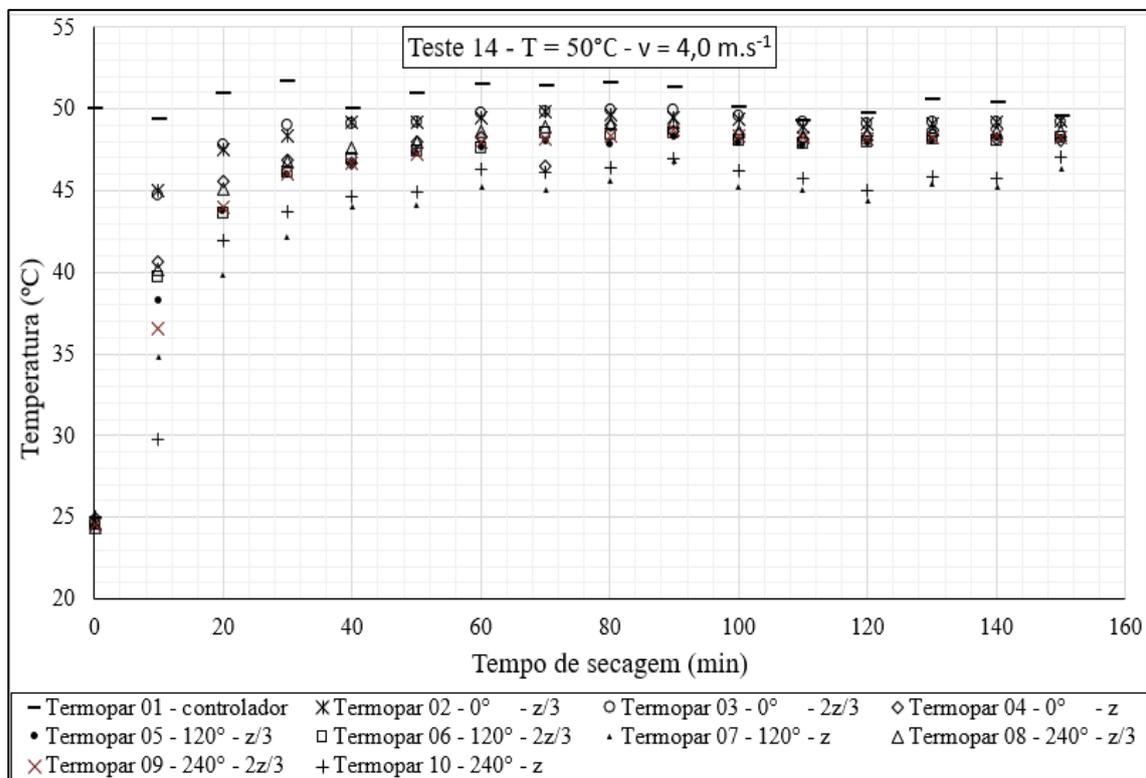
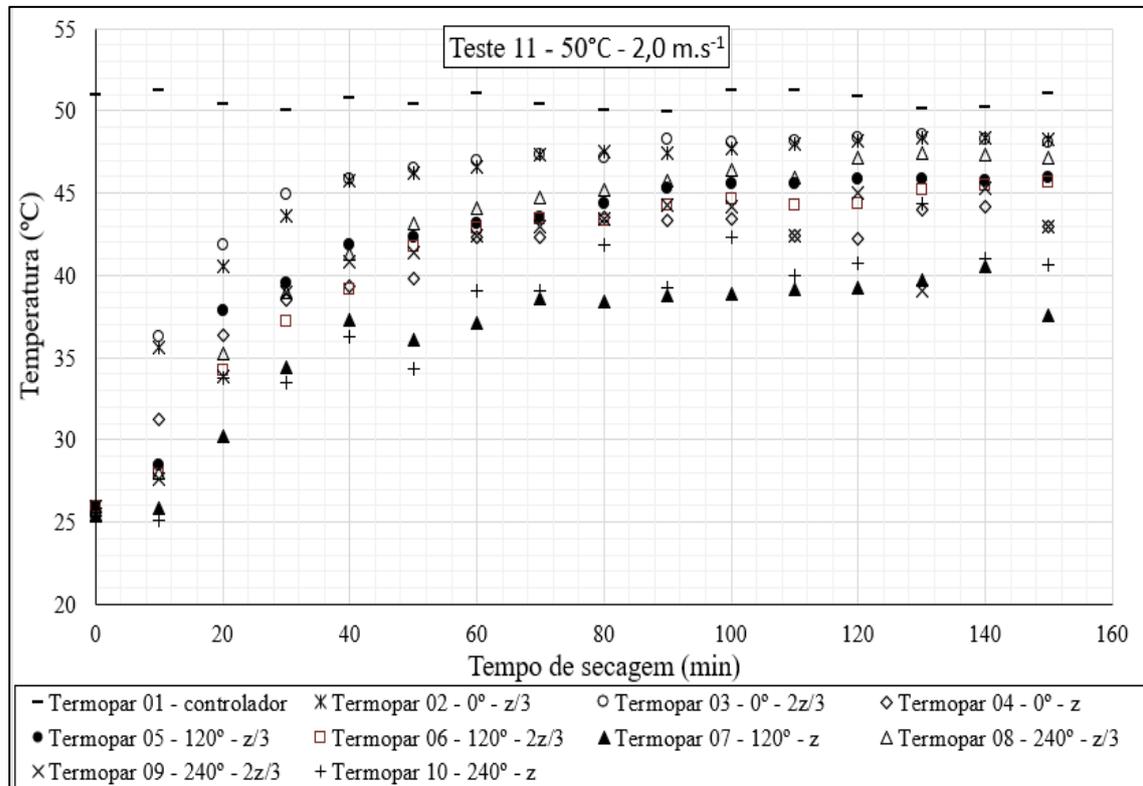
Diante dos fatos observados experimentalmente, a contribuição da mudança na velocidade de escoamento do ar de secagem deve ser considerada no desenvolvimento do modelo. Devido os resultados de teor de umidade e temperatura do leito mostrarem variações axial e radial, simulações unidimensionais podem apresentar erros ao confrontar com dados experimentais, desta forma, simulações tridimensionais podem fornecer melhores resultados comparativos.

FIGURA 4.11– Temperaturas dos termopares 01 a 10 para os testes 10 e 13 em diferentes velocidades e mesma temperatura para o ar de secagem.



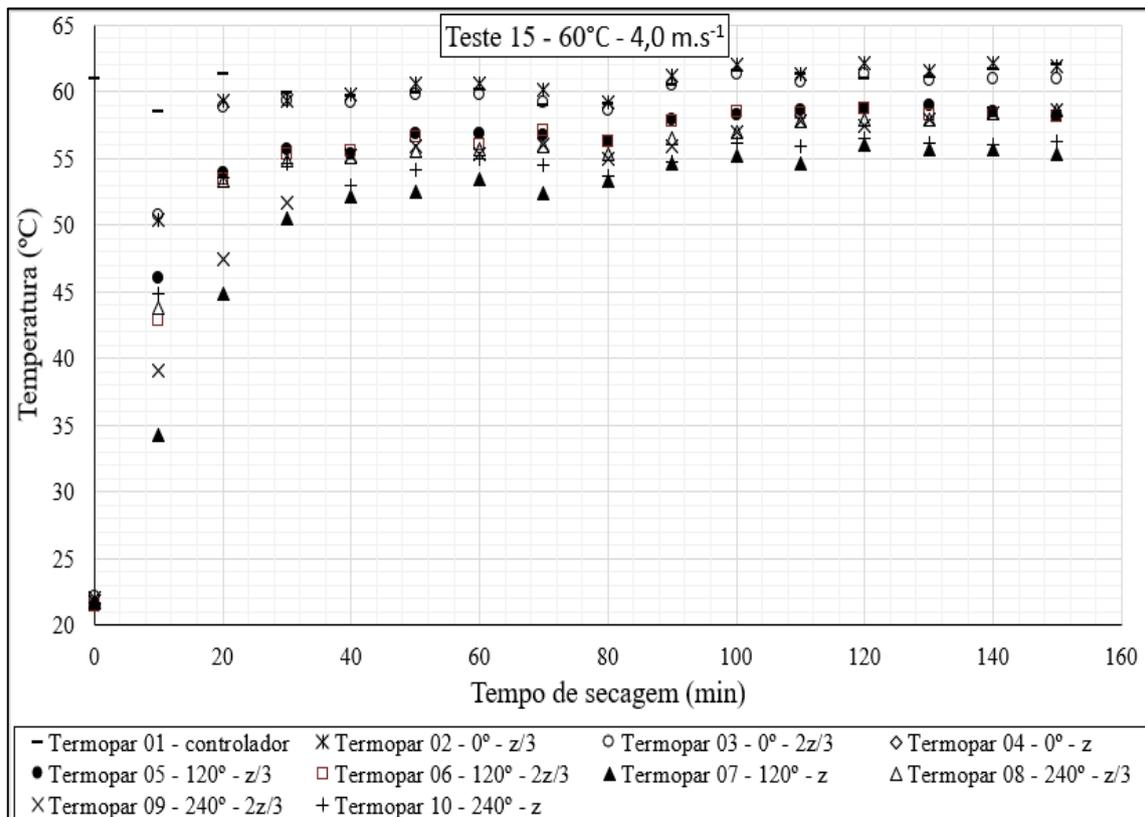
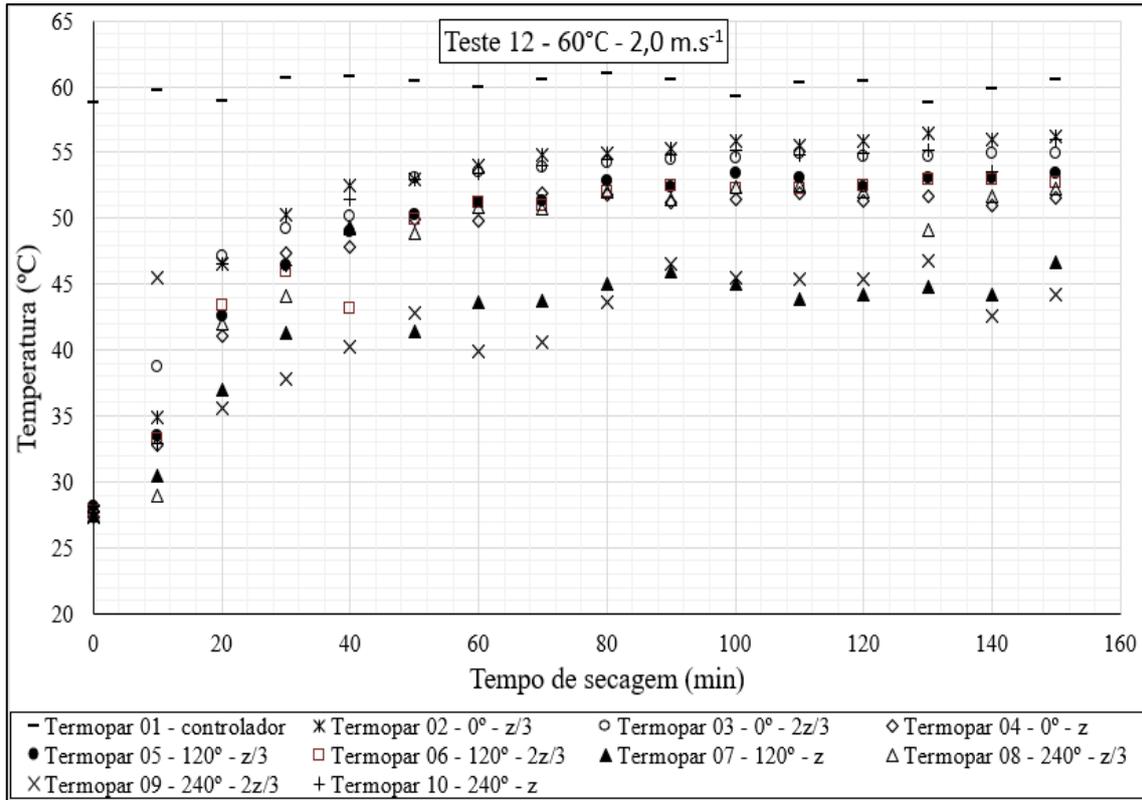
FONTE: Próprio autor.

FIGURA 4.12– Temperaturas dos termopares 01 a 10 para os testes 11 e 14 em diferentes velocidades e mesma temperatura para o ar de secagem.



FONTE: Próprio autor.

FIGURA 4.13– Temperaturas dos termopares 01 a 10 para os testes 12 e15 em diferentes velocidades e mesma temperatura para o ar de secagem.



FONTE: Próprio autor.

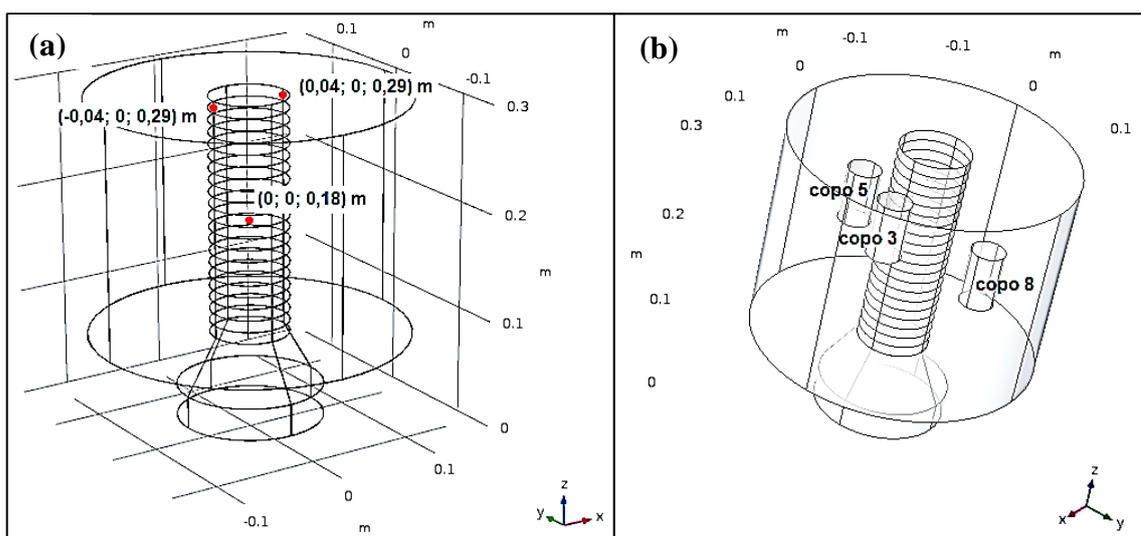
## 5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações computacionais realizadas para os seis testes, de acordo com as configurações dadas nos QUADROS 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. Os resultados foram obtidos para o teor médio de umidade do leito, temperatura média do leito e dos grãos e umidade absoluta média do leito. Também foram gerados os resultados para o teor de umidade dos copos e temperatura dos termopares, posicionados segundo as TAB. 3.3 e 3.4. Os dados experimentais foram comparados com os numéricos, com a finalidade de validação do modelo de secagem em camada espessa proposto. Antes de executar as simulações foram feitos testes para seleção da malha a ser utilizada, e estes são apresentados no início deste capítulo.

### 5.1 Testes para seleção da malha

A análise da malha foi realizada segundo a divisão da geometria em dois domínios (FIG. 3.21). Um passo de tempo de 30s foi fixado e variações no número de elementos foram feitas. A análise dos resultados foi conduzida pela comparação em três posições fixas no interior de cada domínio (FIG. 5.1), obtidos no tempo de secagem de 4800s (domínio 1) e 4500s (domínio 2).

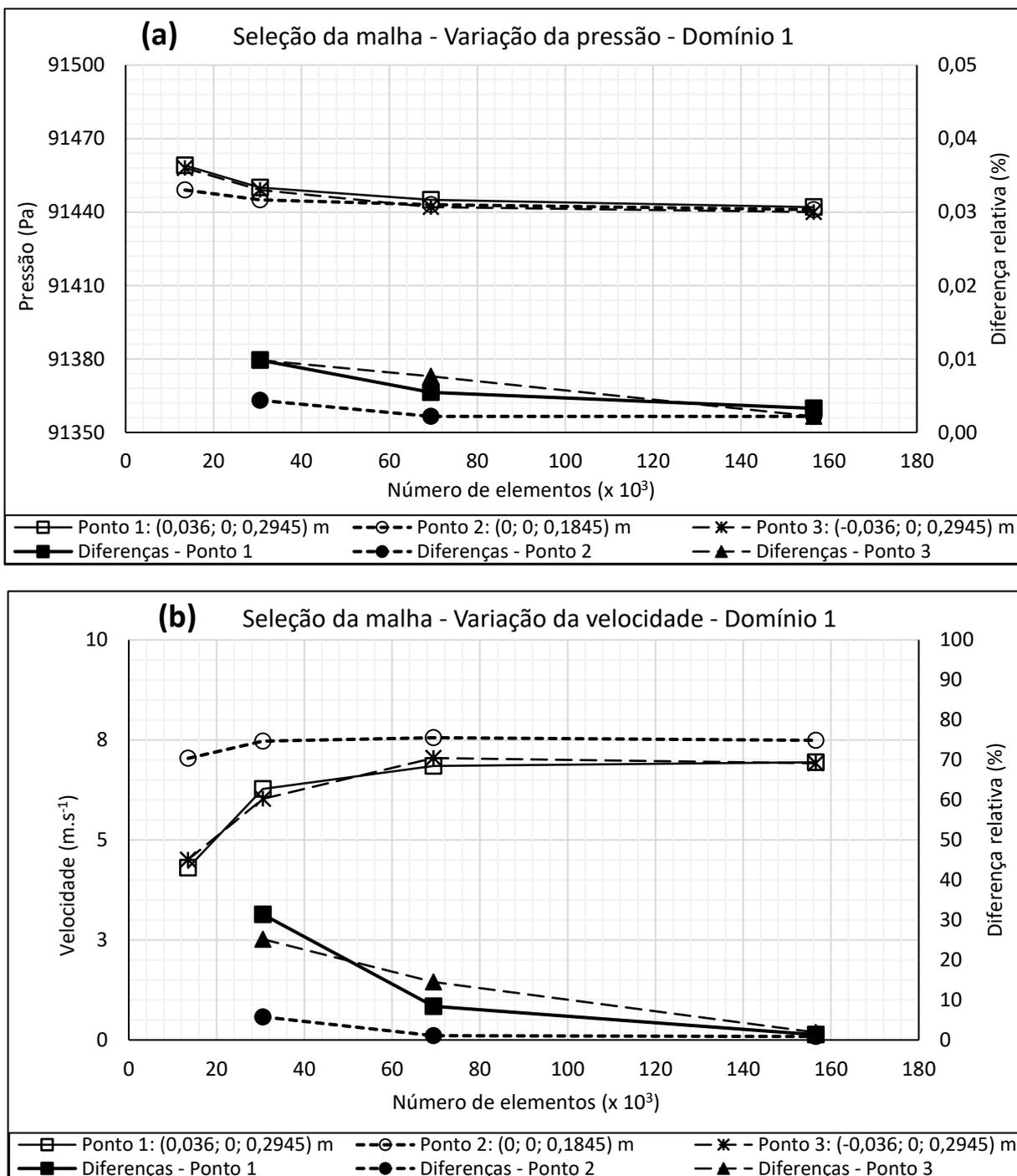
FIGURA 5.1 – Posições específicas para a realização dos testes de malha no domínio 1 (a) e no domínio 2 (b).



FONTE: Próprio autor.

As variáveis pressão e velocidade foram escolhidas para análise da malha no domínio 1. Quatro malhas contendo 13506 (malha 1), 30559 (malha 2), 69431 (malha 3) e 156535 (malha 4) elementos foram geradas no *software COMSOL Multiphysics*. Os resultados estão mostrados no FIG. 5.2.

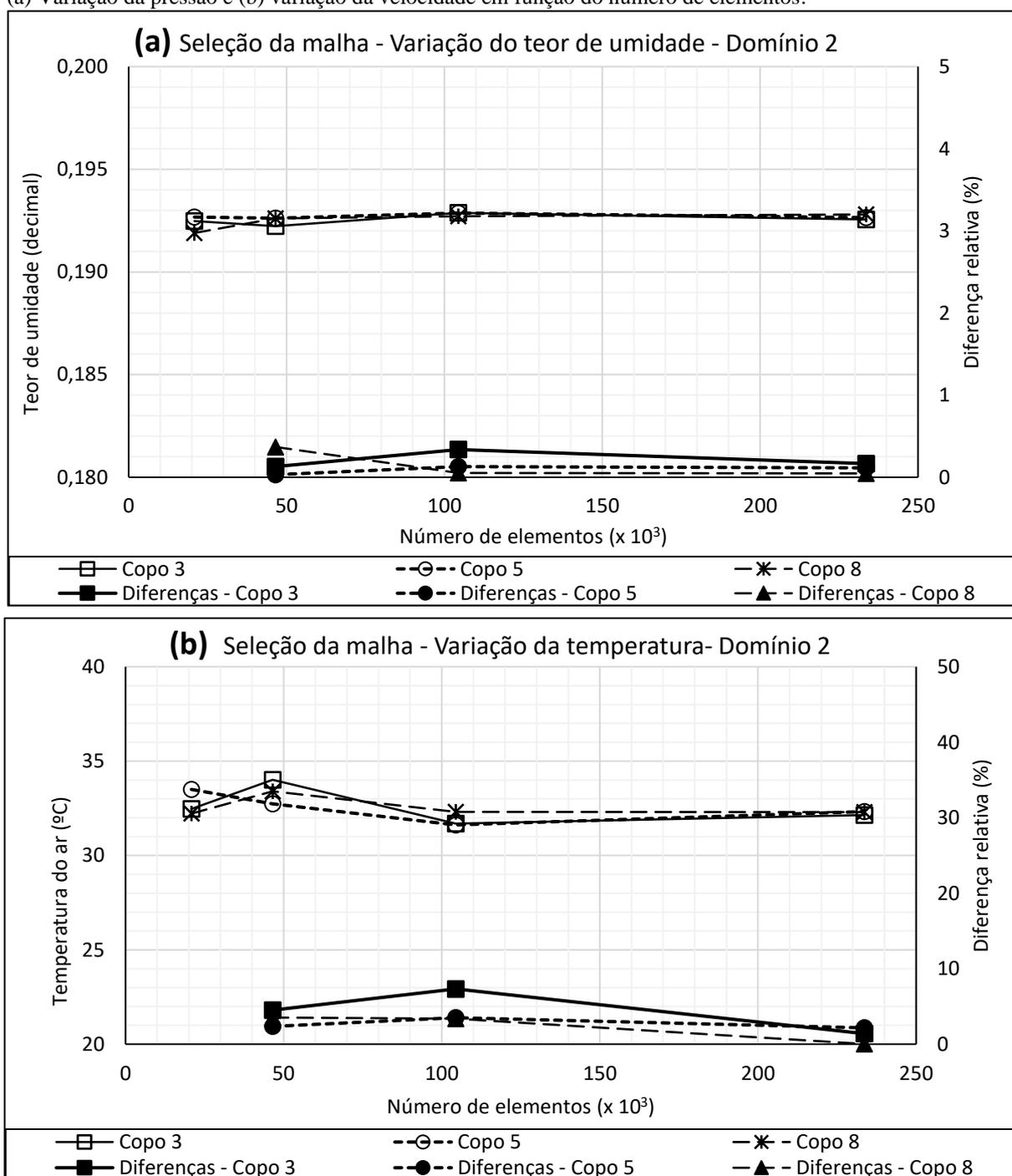
FIGURA 5.2 – Diagramas para seleção da malha na geometria do domínio 1 em três posições distintas. (a) Variação da pressão e (b) variação da velocidade em função do número de elementos.



FONTE: Próprio autor.

Quatro malhas também foram geradas para a análise no domínio 2. Estas foram designadas como malha 5, malha 6, malha 7 e malha 8, contendo 20831, 46513, 104447 e 233601 elementos, respectivamente. As variações no teor de umidade e temperatura foram medidas em três posições distintas, e os resultados são mostrados no FIG. 5.3.

FIGURA 5.3 – Diagramas para validação da malha da geometria do domínio 1 em três posições distintas. (a) Variação da pressão e (b) variação da velocidade em função do número de elementos.



FONTE: Próprio autor.

Como pode ser visto nos FIG. 5.2 e 5.3, a partir das malhas 3 e 7 não há variações significativas nas variáveis analisadas, seja para o domínio 1 ou domínio 2. As diferenças relativas com relação aos resultados nas malhas mais refinadas foram inferiores a 3,0% (TAB. 5.1), sendo valores considerados satisfatórios para a convergência da malha.

Na TAB 5.1 são mostrados os resultados para a análise da malha pelo método GCI. Para esta análise foram utilizadas as três malhas mais refinadas de cada domínio. Todos os valores obtidos foram inferiores a 1% para cada uma das duas variáveis analisadas em cada domínio. Esta análise mostra que a partir da malha intermediária, malha 3 no domínio 1 e malha 7 no domínio 2, os resultados obtidos nas simulações não variam com a malha utilizada. Nesta condição ocorreu a independência dos resultados da simulação quanto ao refinamento. Os valores de GCI também podem ser usados como medida da incerteza dos resultados obtidos nas simulações (ASME, 2009).

TABELA 5.1 – Configurações e valores dos parâmetros para o teste de convergência da malha.

Geometria	Variável	Posição	Parâmetro (ASME, 2009)		Resolução selecionada
			GCI (%)	Diferença (%)	
Domínio 1	Pressão	Ponto 1	< 0,01	< 0,01	Malha 3 (69431 elementos)
		Ponto 2	< 0,01	< 0,01	
		Ponto 3	< 0,01	< 0,01	
	Velocidade	Ponto 1	0,31	1,32	
		Ponto 2	0,58	0,86	
		Ponto 3	0,34	1,89	
Domínio 2	Teor de umidade	Copo 3	0,20	0,17	Malha 7 (104447 elementos)
		Copo 5	0,07	0,11	
		Copo 8	0,03	0,05	
	Temperatura	Copo 3	0,48	1,40	
		Copo 5	0,74	2,17	
		Copo 8	0,01	0,03	

FONTE: Próprio autor.

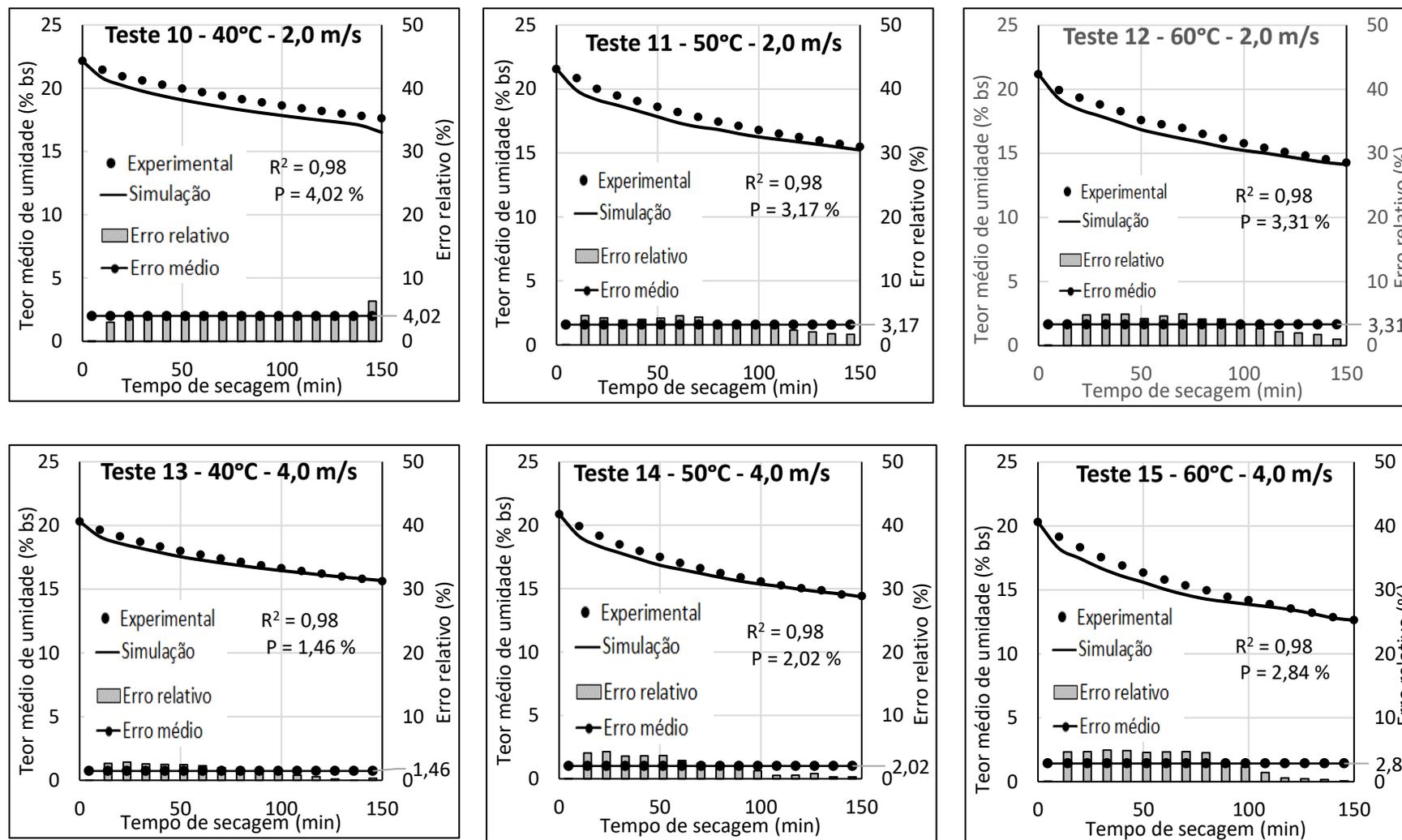
Desta forma, as malhas 3 e 7 foram selecionadas para executar as simulações. A malha 3 foi usada para simular o escoamento do ar no interior do duto central, sendo aplicada para solução das equações do módulo “*Fluid Flow*” e “*Heat Transfer*” no *COMSOL Multiphysics*. A malha 7 foi utilizada para simular o processo de secagem do milho na câmara, sendo aplicada para solucionar as equações de pressão e secagem (3.11; 3.12; 3.13; 3.14 e 4.10) na interface *COMSOL PDE*.

## 5.2 Testes para validação do modelo tridimensional de secagem em camada espessa

A validação do modelo matemático tridimensional de secagem do milho, dado pelas equações (3.11) a (3.14) e (4.10) implementadas no *software COMSOL Multiphysics*, foi realizada confrontando os resultados numéricos obtidos com os dados experimentais. Para tanto, os resultados para o teor médio de umidade obtidos no leito e nos copos, e para a temperatura média e local do ar de secagem obtidos na câmara, foram comparados. Os parâmetros estatísticos dados pelas EQ. (4.5) e (4.7) foram usados para realizar a análise.

A comparação dos resultados simulados e experimentais para o teor médio de umidade dos grãos no leito, são mostrados no FIG. 5.4 para todos os seis testes realizados. Com pode ser visto, os valores obtidos nas simulações corroboram com os experimentais a um nível muito satisfatório em todos os testes. Isto pode ser comprovado pela análise estatística, onde foram obtidos valores de  $R^2$  iguais a 0,98 em todos os testes, e valores de P iguais ou menores do que 4,02%. Observou-se que, apenas no último tempo de secagem do teste 10 o valor do erro relativo individual superou o nível de 5,00 %, sendo este também o valor máximo individual (6,36%). De uma forma geral, o modelo de secagem subestima a um nível médio de 2,80%, o teor de umidade médio dos grãos, e os resultados para os testes realizados em uma velocidade maior revelaram ser um pouco mais precisos.

FIGURA 5.4 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para o teor médio de umidade dos grãos na câmara de secagem obtidos nos testes 10 a 15.



FONTE: Próprio autor.

As simulações do teor de umidade também foram realizadas em nove diferentes regiões na câmara de secagem, definidas como “copos”, dadas segundo a TAB. 3.4. Os resultados obtidos foram comparados com os experimentais e são mostrados na TAB. 5.2 e nos FIG. 5.5 e 5.6.

TABELA 5.2 – Parâmetros estatísticos obtidos na comparação dos resultados simulados com os experimentais para o teor de umidade em cada copo.

Posição	Teste 10		Teste 11		Teste 12		Teste 13		Teste 14		Teste 15	
	R <sup>2</sup>	P (%)										
Copo 1	1,00	0,50	0,98	1,76	0,99	2,84	0,99	1,23	1,00	0,58	0,99	1,48
Copo 2	0,99	0,88	0,99	1,12	0,99	3,42	0,99	0,81	0,99	1,04	1,00	1,00
Copo 3	1,00	0,14	1,00	0,88	1,00	4,65	0,99	0,84	1,00	0,44	0,99	1,31
Copo 4	0,97	1,13	0,99	1,81	0,99	1,19	0,99	0,78	0,99	0,84	0,98	1,87
Copo 5	0,98	2,36	0,96	3,04	0,99	1,30	1,00	0,90	0,99	1,21	0,99	1,30
Copo 6	0,99	1,04	0,98	2,01	0,99	1,45	0,98	1,20	1,00	0,72	0,95	4,34
Copo 7	0,95	6,76	0,94	6,09	0,95	4,88	0,98	0,94	0,97	2,92	0,97	2,93
Copo 8	0,94	3,87	0,96	3,33	0,93	4,80	0,96	2,08	0,97	2,29	0,98	2,16
Copo 9	0,98	4,90	0,94	5,36	0,94	8,32	0,98	1,18	0,97	4,91	0,99	1,38

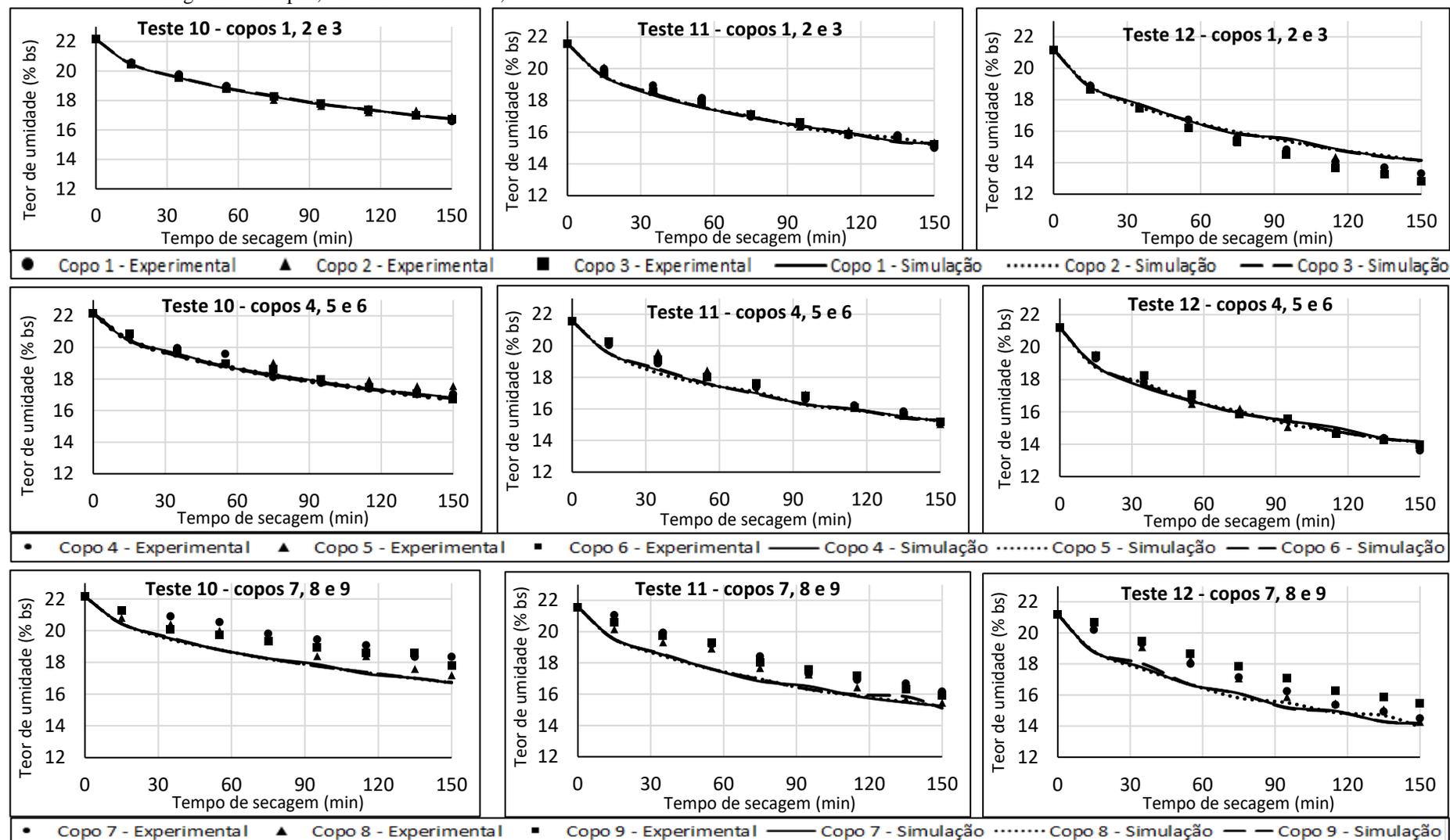
FONTE: Próprio autor.

De acordo com os resultados observou-se que em todos os copos analisados, o modelo de secagem usado fornece uma previsão satisfatória do teor de umidade dos grãos. Esta observação é fundamentada nos baixos níveis do desvio médio relativo (P) obtidos nos testes, sendo que, níveis inferiores a 5,0 % foram evidenciados em 50 dos 54 resultados, e o valor máximo foi de 8,3 %. Quanto aos valores do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), níveis iguais ou superiores a 0,97 foram obtidos em 43 resultados, e o valor mínimo foi de 0,93. Em geral, o modelo mostrou uma exatidão mais acurada para os copos mais próximos ao duto central (copos 1, 2 e 3), e um comportamento subestimado para o teor de umidade para os copos mais distantes (copos 7, 8 e 9), nos testes em velocidade mais baixa (testes 10, 11 e 12).

A análise das curvas nos gráficos mostrou que não há distinção significativa do teor de umidade dos grãos quanto à altura no interior da câmara. Entretanto, uma variação pequena é observada quanto ao raio, principalmente em relação às posições mais distantes do duto central. Estas observações podem estar relacionadas a uma distribuição bem uniforme do ar no duto central (domínio 1).

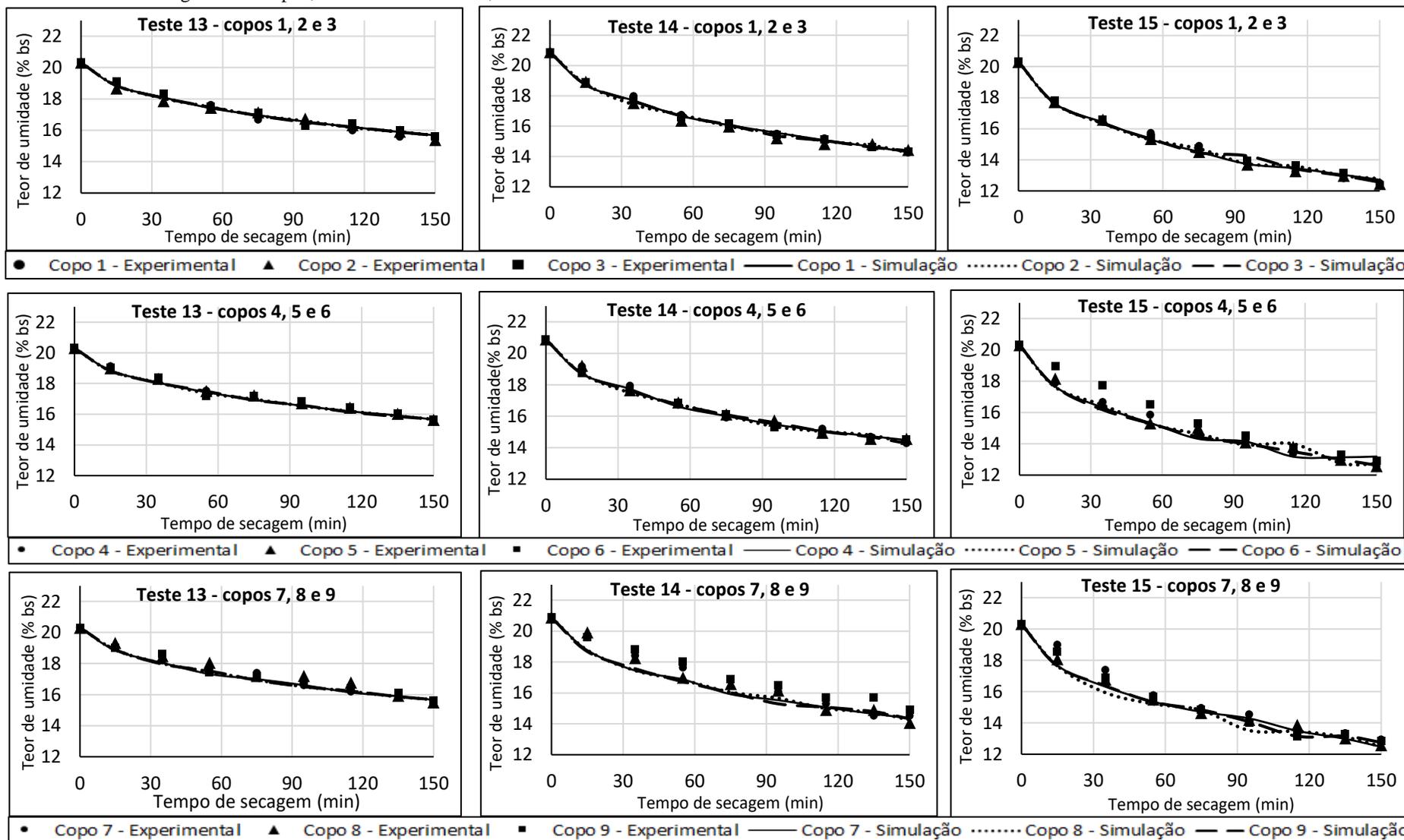
Os resultados analisados indicam a precisão do modelo para prever o teor de umidade dos grãos durante a secagem do milho. Valores similares a estes foram obtidos por Zhao *et al.* (2018), Elgamal *et al.* (2017), Liu *et al.* (2015), Ranjbaran *et al.* (2014) e Zare e Chen (2009), e considerados satisfatórios para validação dos modelos de secagem testados.

FIGURA 5.5 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para o teor de umidade dos grãos nos copos, obtidos nos testes 10, 11 e 12.



FONTE: Próprio autor.

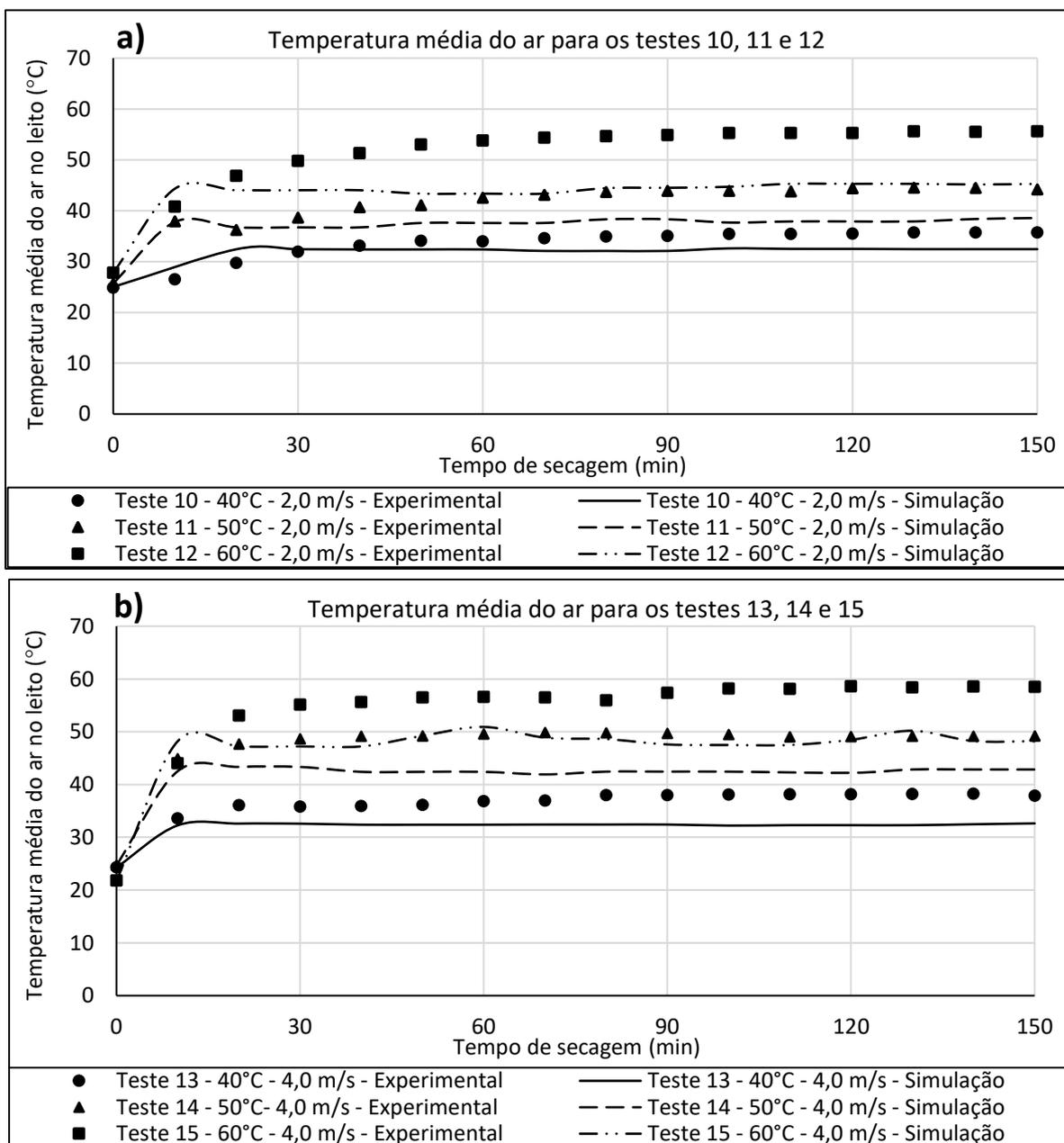
FIGURA 5.6 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para o teor de umidade dos grãos nos copos, obtidos nos testes 13, 14 e 15.



FONTE: Próprio autor.

Os resultados para a variação temporal da temperatura média do ar na câmara de secagem, obtidos nas simulações numéricas e experimentalmente foram confrontados, sendo os dados mostrados no FIG. 5.7.

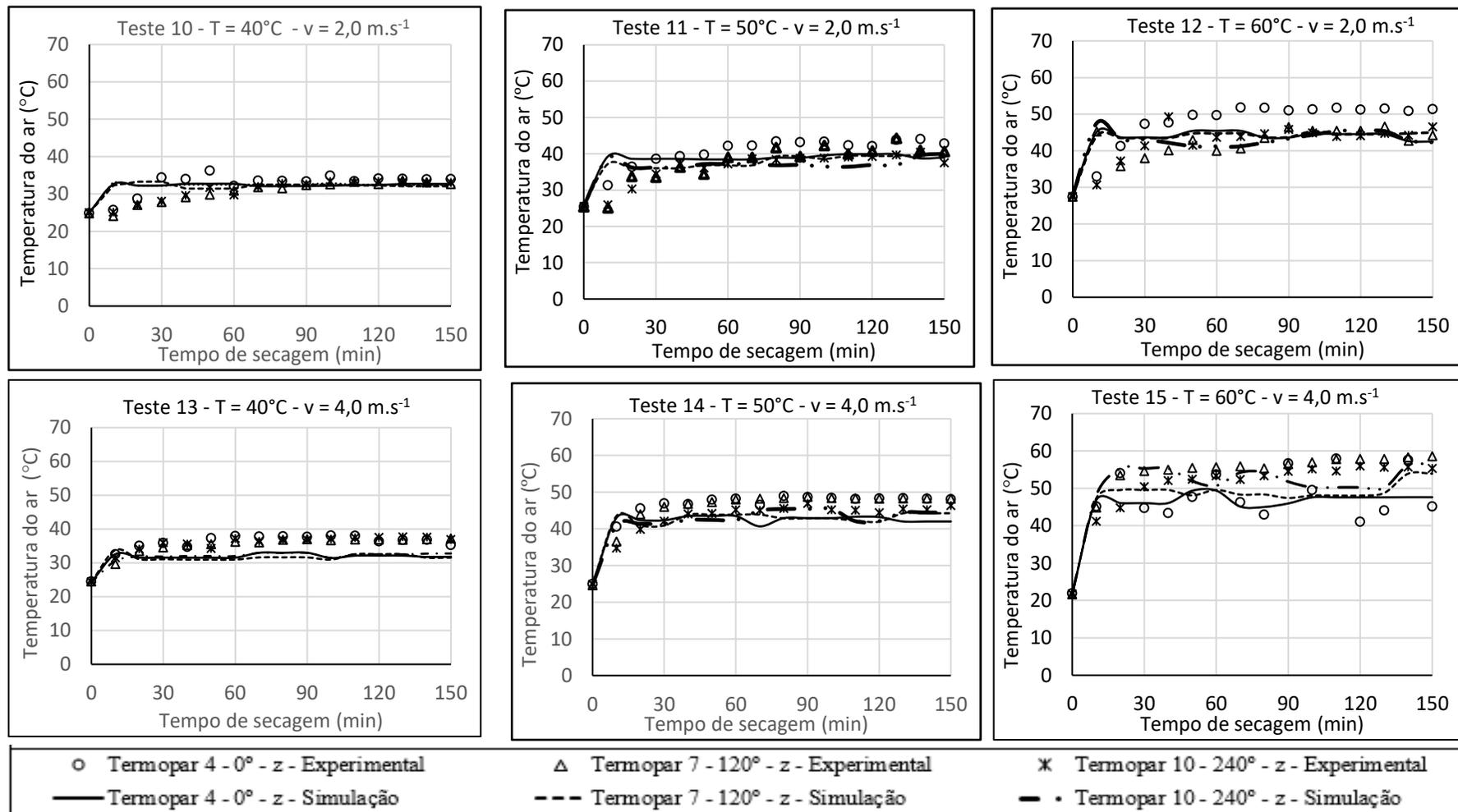
FIGURA 5.7 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para a temperatura média do ar na câmara de secagem. (a) Testes 10, 11 e 12 e (b) testes 13, 14 e 15.



FONTE: Próprio autor.

A variação temporal da temperatura do ar em três posições distintas dentro da câmara de secagem foi avaliada para os termopares 4, 7 e 10. Os resultados experimentais foram confrontados com os numéricos e são mostrados no FIG. 5.8.

FIGURA 5.8 – Diagramas para validação do modelo tridimensional de secagem do milho em camada espessa. Comparação dos resultados experimentais e simulados para a temperatura do ar obtidos nos testes 10 a 15.



FONTE: Próprio autor.

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando o desvio médio relativo (P) dos resultados simulados em relação aos experimentais, estes dados são mostrados na TAB. 5.3.

TABELA 5.3 – Valores para o desvio médio relativo (P) obtidos na comparação dos resultados simulados com os experimentais para a temperatura do ar na câmara e nos termopares 4, 7 e 10.

Local / posição	Desvio médio relativo – P (%)					
	Teste 10	Teste 11	Teste 12	Teste 13	Teste 14	Teste 15
Média na câmara	7,5	9,9	15,4	11,7	12,5	14,0
Termopar 4	6,3	7,8	13,0	9,7	9,8	8,4
Termopar 7	6,5	6,4	6,6	12,1	4,9	8,4
Termopar 10	4,2	7,0	4,5	10,2	8,4	6,3

FONTE: Próprio autor.

Os resultados mostrados no FIG. 5.7 e TAB. 5.3 indicam que a diferença entre os dados experimentais e simulados foi menor em temperaturas mais baixas. No teste 10, a diferença média foi de apenas 7,5%. No entanto, essa diferença aumentou gradualmente à medida que a temperatura aumentou, atingindo um valor máximo de 15,4% no teste 12. Além disso, um aumento na velocidade do ar de secagem teve um impacto negativo na comparação de modelos em temperaturas mais baixas (Testes 10 e 11), pois aumentou a diferença entre os dados simulados e experimentais (Testes 13 e 14). Por outro lado, na temperatura mais elevada (Testes 12 e 15), apesar de diminuir a diferença na comparação dos resultados, o efeito é pouco significativo.

Como pode ser visto nos FIG. 5.7 e 5.8, no início da secagem ocorre um aumento mais acentuado da temperatura do ar, sendo que isso pode ser observado tanto para os diagramas experimentais quanto simulados, demonstrando uma concordância no perfil das curvas. Este aumento acentuado nos minutos iniciais da secagem está relacionado à transferência de calor que ocorre inicialmente apenas para o aquecimento dos grãos. O comportamento posterior das curvas mostra uma tendência à estabilidade da temperatura, neste momento o calor é usado apenas para evaporar a água do interior dos grãos. De acordo com a TAB. 5.3, observou-se uma concordância satisfatória dos resultados numéricos com os experimentais nos diferentes testes, com desvios médios relativos variando de 4 a 15%, aproximadamente. Isto é fundamentado nos diversos estudos de simulação da secagem de grãos realizados nos últimos vinte anos (ZHAO *et al.*, 2018; ELGAMAL *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2015; RANJBARAN *et al.*, 2014; ZARE e CHEN, 2009; TANG *et al.*, 2004; DIMITRIADIS e AKRITIDIS, 2004; KALBASI, 2003), onde os autores obtiveram diferenças entre os parâmetros medidos e previstos entre 10 e 15%, tanto para valores médios como locais. Nesses trabalhos os resultados foram considerados satisfatórios para validação dos modelos de simulação propostos.

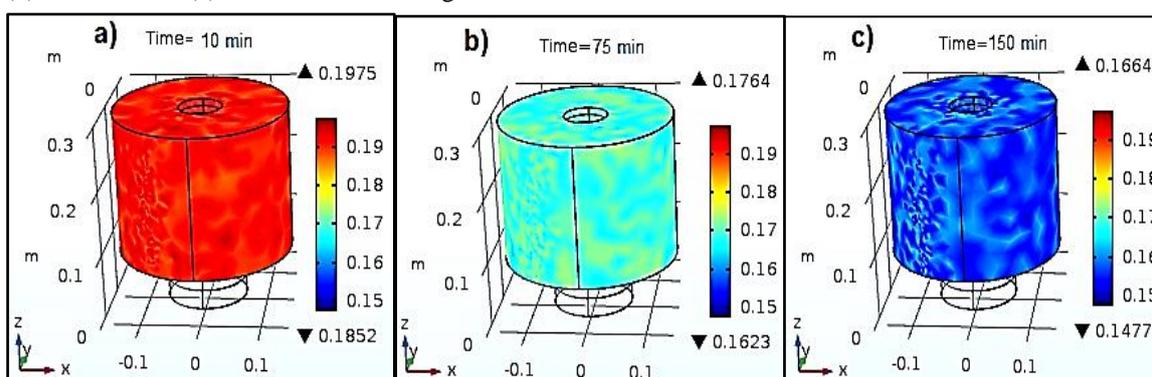
As diferenças entre os valores simulados e experimentais podem ter ocorrido por diversos fatores, entre estes podem ser citados: problemas na utilização de uma camada fina para prever o comportamento da camada espessa de grãos, não considerar o encolhimento dos grãos durante a secagem, erros nas medições experimentais e erros na previsão da queda de pressão.

Após a análise de todos os resultados obtidos, pode-se constatar em geral, que a precisão do presente modelo é satisfatória em comparação com os resultados experimentais, e alcançou um nível de precisão semelhante aos relatados em trabalhos recentes de secagem de grãos (DODER e DJAKOVIC, 2019; LAMBERT *et al.*, 2018; ZHAO *et al.*, 2018; ELGAMAL *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2015; RANJBARAN *et al.*, 2014; ZARE e CHEN, 2009), validando desta forma o modelo proposto neste trabalho.

### 5.3 Curvas de distribuição e análise de eficiências no secador projetado

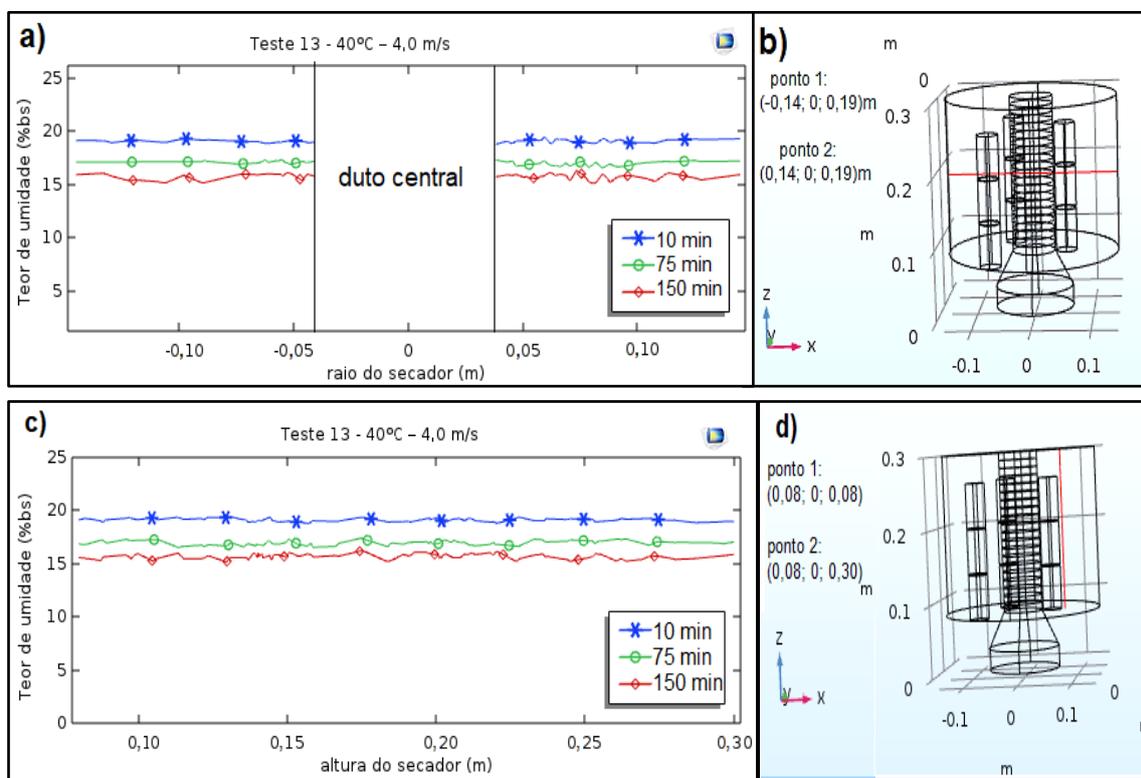
Uma vez validado o modelo proposto, este foi usado para avaliar o perfil do teor de umidade no interior do leito de grãos em três diferentes tempos de secagem (10 min, 75 min e 150 min). A análise foi realizada para os testes em uma posição radial e outra axial (altura), em duas linhas intermediárias dentro do leito de grãos (FIG. 5.10 b e d). Os resultados são mostrados na FIG. 5.9 e no FIG. 5.10 para o teste 13.

FIGURA 5.9 – Perfil do teor de umidade dos grãos obtidos na simulação computacional após (a) 10 minutos, (b) 75 minutos e (c) 150 minutos de secagem.



FONTE: Próprio autor

FIGURA 5.10 – Diagramas para o perfil do teor de umidade no interior do leito de grãos. (a) Diagrama para variação do teor de umidade com a posição radial. (b) Posição radial analisada. (c) Diagrama para variação do teor de umidade com a altura. (d) Posição axial analisada.



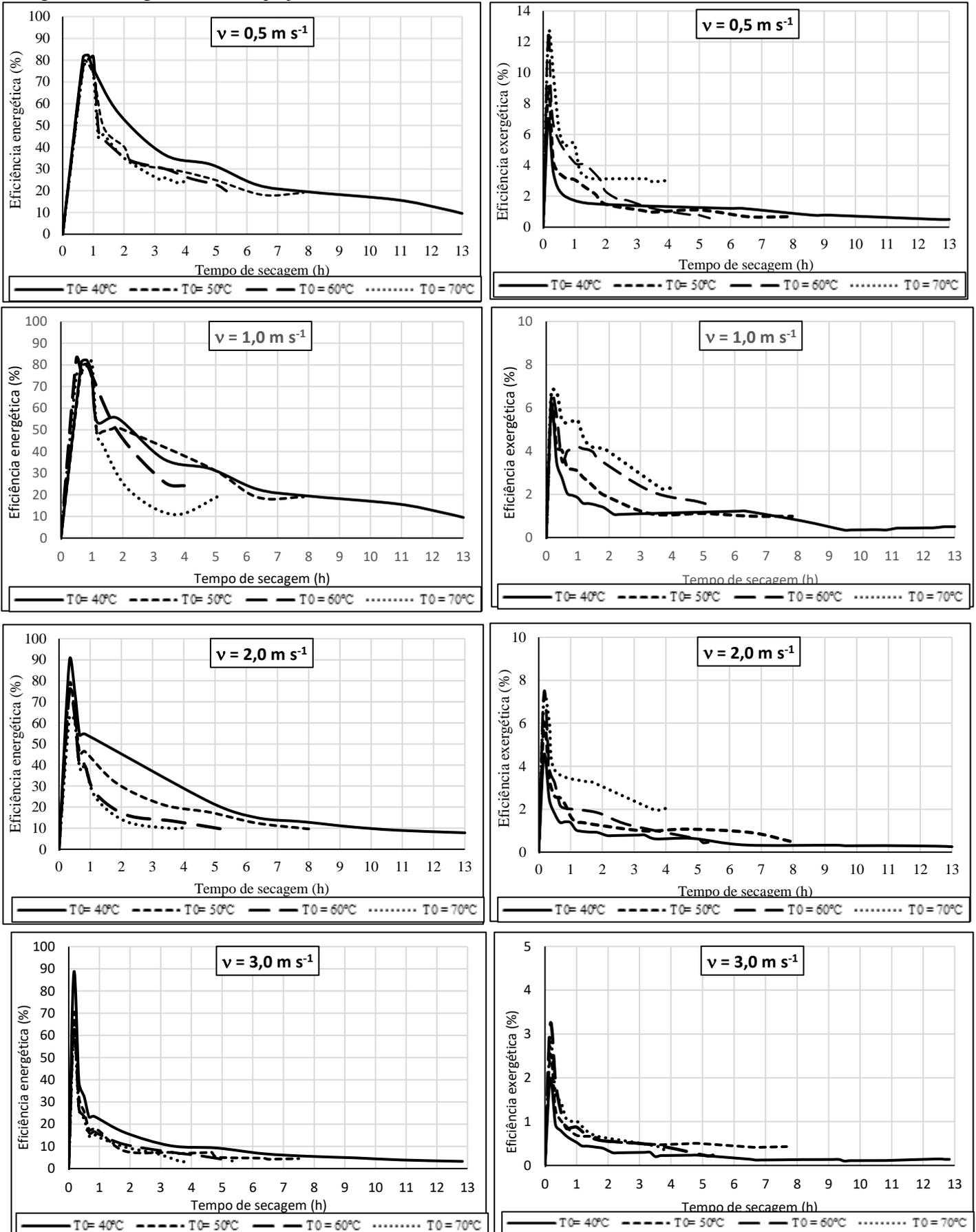
FONTE: Próprio autor.

Os outros testes e posições no leito mostraram resultados semelhantes aos obtidos na FIG. 5.9 e FIG. 5.10. Observa-se um comportamento aproximadamente constante para o teor de umidade ao longo do raio e da altura no leito, sendo esse resultado muito importante pois mostra uma distribuição uniforme desta propriedade para os grãos no leito. Salienta-se que, em trabalhos de secagem de grãos em secadores com entrada de ar apenas axial, realizados por França *et al.* (1994), Souza *et al.* (2002), Bortolaia, (2011), Souza *et al.* (2015) e Liu *et al.* (2015), este comportamento não foi observado nas simulações realizadas. Nestes trabalhos, os grãos em posições superiores no leito apresentaram diferenças entre 20 a 50% no teor de umidade em relação aos localizados mais abaixo. As simulações executadas mostraram que o secador desenvolvido experimentalmente secou o milho de forma uniforme no seu interior. Este resultado influencia positivamente na qualidade física dos grãos obtidos ao final da secagem, tal como, a redução na quantidade de grãos que, eventualmente, possam estar quebrados ou com trincas.

Além dos resultados simulados para a dinâmica da secagem do milho, também foram executadas simulações para as análises energética e exergética no secador cilíndrico projetado. Estas foram obtidas em diferentes condições de temperatura ( $T_0$ ) e velocidade ( $v$ ) do ar de secagem na entrada. Nos FIG. 5.11 e 5.12 são mostrados os resultados das simulações para a avaliação dos efeitos da temperatura e da velocidade, respectivamente, nas eficiências energética e exergética.

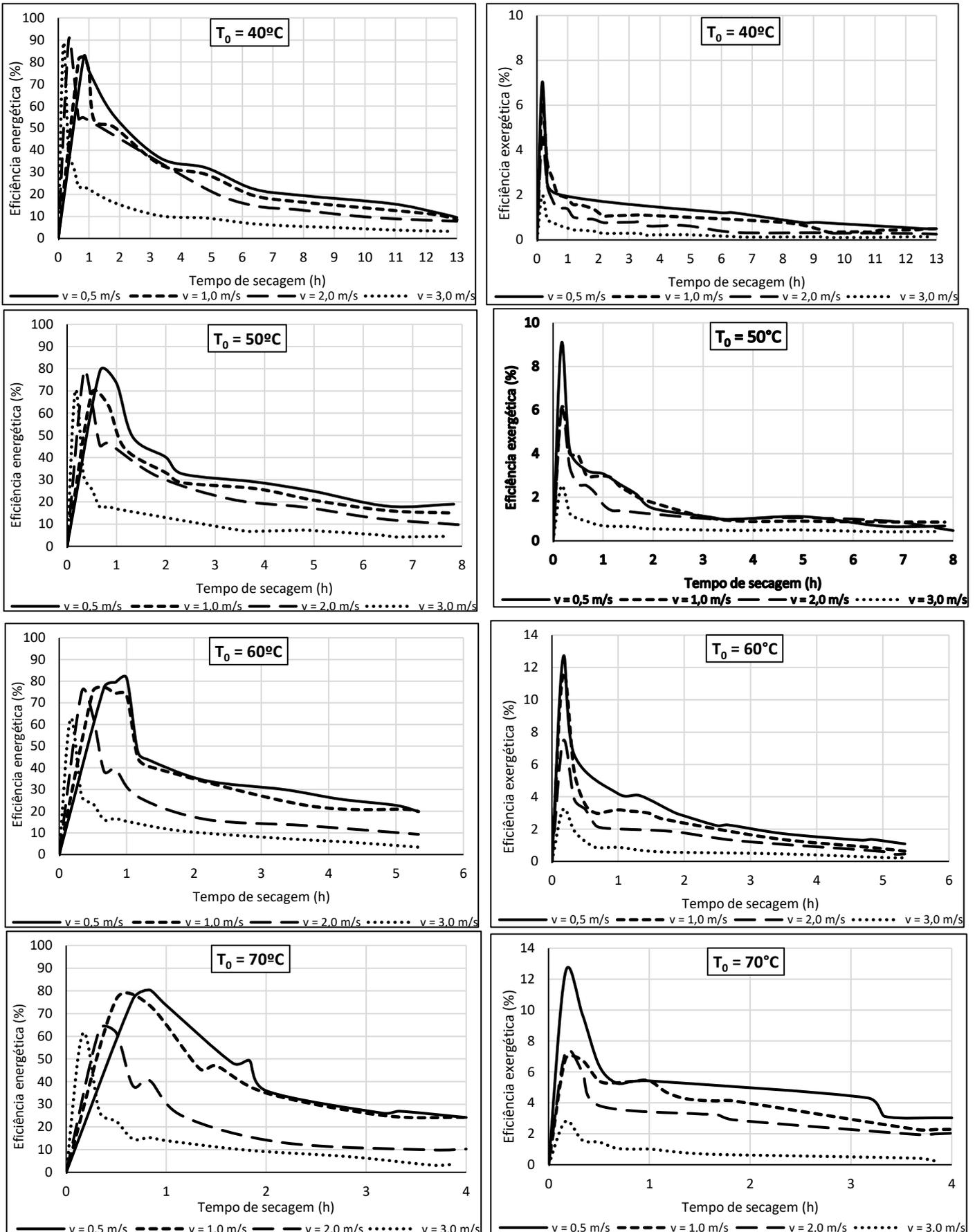
Um comportamento comum é observado no início da secagem nos diagramas dos FIG. 5.11 e 5.12. Neste instante há um rápido crescimento das eficiências energéticas e exergéticas devido a secagem ocorrer em taxas mais elevadas, ou seja, uma grande quantidade de água livre e disponível na superfície dos grãos (umidade superficial) é evaporada com facilidade. Neste momento, são observadas eficiências energéticas e exergéticas de pico de até 90 e 12%, respectivamente. Após este período de pico, as curvas apresentaram um comportamento decrescente, pois toda a água livre foi removida e tem início à remoção da umidade intersticial, sendo de maior dificuldade a sua remoção. Nesta etapa parte da energia é usada para aquecer os grãos, levando a uma diminuição do processo de evaporação, e com a saída de ar aquecido não aproveitado para fora do secador.

FIGURA 5.11 – Diagramas dos resultados numéricos para o efeito da temperatura do ar na entrada nas eficiências energética e exergética da secagem no secador projetado neste trabalho.



FONTE: Próprio autor.

FIGURA 5.12 – Diagramas dos resultados numéricos para o efeito da velocidade do ar na entrada nas eficiências energética e exergetica da secagem no secador projetado neste trabalho.



FONTE: Próprio autor.

O efeito da temperatura do ar nas eficiências energética e exergética é mostrado na FIG. 5.11. Observa-se em geral, uma diminuição da eficiência energética média com o aumento da temperatura. Pois uma maior diferença entre a temperatura do ar na entrada e o ambiente, ocasiona uma maior disponibilidade de energia em relação à entalpia necessária para evaporação da água dos grãos. Isto ocasiona um valor maior no denominador da equação (3.34). Dessa forma, uma melhor eficiência do secador é conseguida na menor temperatura, porém, nesta condição um maior tempo é requerido para a secagem dos grãos até o teor de umidade desejado (12% bs). Assim deve-se ponderar o tempo de secagem e a eficiência energética. Tempos maiores de secagem são necessários em menores temperaturas, ocorrendo uma queda leve e contínua nas curvas de eficiências.

Para a eficiência exergética, observou-se que um aumento na temperatura do ar resulta em valores de eficiência maiores, tanto no pico quanto a média ao longo do tempo. Isto se deve ao fato do termo  $\left(1 - \frac{T_{ar,amb}}{T_{ar}}\right)$ , presente no numerador da equação (3.36), assumir valores maiores.

O efeito da velocidade do ar de secagem na entrada do secador é mostrado no FIG. 5.12. Observa-se um deslocamento dos picos de eficiência energética para a esquerda em todos os diagramas com o aumento da velocidade. Ocasionalmente por uma rápida absorção de calor para evaporar a água superficial presente nos grãos. Apesar disto, a eficiência energética média com o tempo de secagem é menor para velocidades maiores. Isto ocorreu devido a rápida passagem do ar de secagem sobre a superfície granular. Uma maior quantidade de energia saiu do secador sem ser aproveitada e resultou em uma menor eficiência energética. Da mesma forma pode-se explicar a tendência da eficiência exergética. Neste caso foram obtidos valores menores para os picos com o aumento da velocidade, assim como menores valores médios com o tempo de secagem. Desta forma, melhores valores de eficiência exergética foram obtidos em temperaturas mais altas e em velocidades mais baixas.

Os efeitos da temperatura e velocidade do ar nas eficiências energética e exergética relatados anteriormente, também foram observados por Amantéa *et al.* (2013), Ranjbaran e Zare (2013), Ranjbaran *et al.* (2014), Tolentino (2018) e Da Costa *et al.* (2023) em trabalhos de simulação de secagem de grãos.

Os resultados numéricos da dinâmica da secagem foram analisados até o teor de umidade de 12% (bs), quantidade adequada para armazenar os grãos de milho por até 5 anos (TAB 2.1). Estes resultados são mostrados na TAB. 5.4.

Observa-se que um menor tempo de secagem é obtido para maiores temperaturas do ar na entrada. Este comportamento era esperado uma vez que uma maior quantidade de energia está disponível para a retirada de umidade dos grãos. Já para a velocidade do ar na entrada, observa-se pouca ou nenhuma influência no tempo final de secagem. Entretanto, em relação às eficiências energética e exergética é um parâmetro importante, uma vez que são obtidos, de forma geral, menores valores de eficiências para maiores velocidades.

TABELA 5.4 – Resultados numéricos obtidos para a análise da influência da velocidade e temperatura do ar na entrada no tempo e eficiência da secagem, considerando um teor de umidade final de 12% para os grãos.

Velocidade do ar (m.s <sup>-1</sup> )	Temperatura do ar (°C)	Tempo final de secagem (h)	Eficiência energética (%)	Eficiência exergética (%)
0,5	40	13,0	9,5	0,5
0,5	50	7,8	19,0	0,7
0,5	60	5,3	19,8	0,6
<b>0,5</b>	<b>70</b>	<b>4,0</b>	<b>24,2</b>	<b>3,0</b>
1,0	40	13,0	9,5	0,5
1,0	50	7,8	19,0	1,0
1,0	60	5,3	19,8	1,4
<b>1,0</b>	<b>70</b>	<b>4,0</b>	<b>24,2</b>	<b>2,3</b>
2,0	40	13,0	7,8	0,3
2,0	50	8,0	9,6	0,5
2,0	60	5,3	9,3	0,5
2,0	70	4,0	10,2	2,0
3,0	40	12,8	3,2	0,1
3,0	50	7,7	4,5	0,4
3,0	60	5,3	3,4	0,2
3,0	70	3,8	3,4	0,2

FONTE: Próprio autor.

Conforme mostrado na TAB. 5.4, uma melhor eficiência energética (24,2%) e um menor tempo final (4,0 horas) são obtidos na temperatura de 70°C e velocidades de 0,5 e 1,0 m.s<sup>-1</sup>. Estas duas condições apresentaram uma eficiência exergética muito próxima (3,0 e 2,3%, respectivamente). Desta forma, as duas condições citadas e destacadas na TAB. 5.4 podem ser usadas no secador projetado para obtenção de secagens do milho mais eficientes.

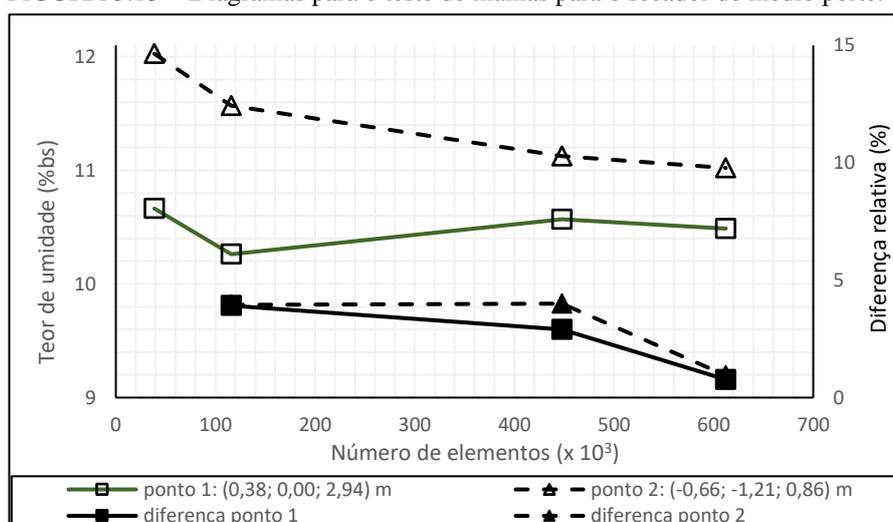
#### 5.4 Secador cilíndrico de médio porte

Após a validação do modelo proposto, foi realizado a simulação da secagem do milho em um secador com dimensões próximas a de um secador real, podendo este ser usado na secagem de grãos em pequenas propriedades agrárias. Para este procedimento foi realizado um novo teste de malha de forma similar ao que ocorreu no item 5.1. As dimensões deste secador proposto foram obtidas multiplicando por 10 cada dimensão do secador em escala reduzida, sendo que maiores detalhes das configurações do secador desta etapa são mostrados na TAB. 3.4. As simulações foram executadas nas duas melhores condições de secagem descritas na TAB. 5.4. Os resultados destes testes são mostrados a seguir.

Os resultados para o teste de malha são mostrados no FIG. 5.13, onde dois pontos foram selecionados de maneira aleatória no interior do leito de grãos. Foi analisada a variação do teor médio de umidade. Como pode ser visto, os pontos mostraram variações inferiores a 5% para todas as comparações, sendo menores que 1% para as duas malhas mais refinadas (447648 e 612233 elementos). Desta forma, a malha com 447648 elementos foi escolhida para as simulações.

A qualidade da malha também foi avaliada com base nos parâmetros fator de curvatura e taxa de crescimento. De acordo com Ranjbaran e Zare (2012), valores satisfatórios para esses parâmetros são inferiores a 1,0 e 1,5, respectivamente. Os valores obtidos neste estudo foram de 0,5 para o fator de curvatura e 1,4 para a taxa de crescimento.

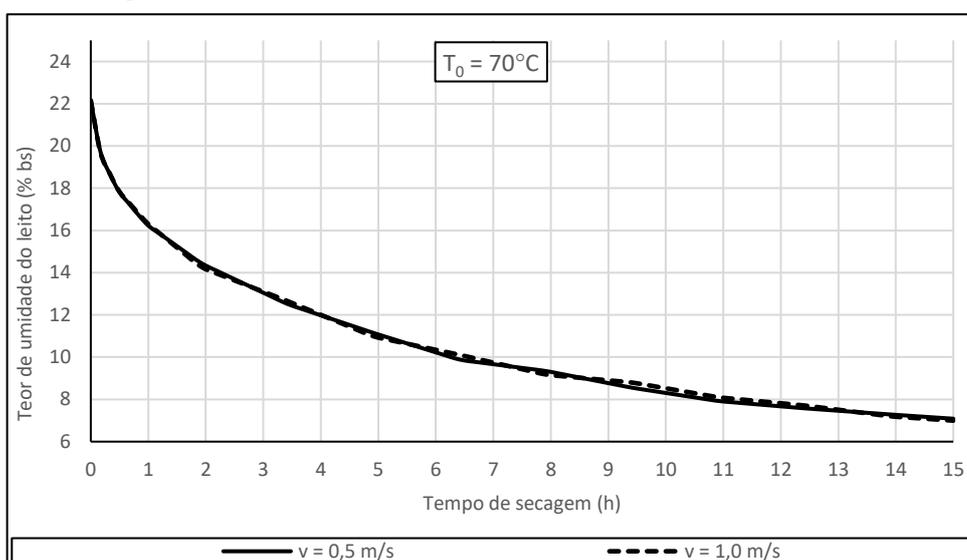
FIGURA 5.13 – Diagramas para o teste de malhas para o secador de médio porte.



FONTE: Próprio autor.

A dinâmica da secagem do milho pode ser vista no FIG. 5.14 para as duas condições de secagem simuladas no secador de médio porte. Observa-se um perfil de teor de umidade média concordante com o processo de secagem em sua plenitude. Este comportamento é frequentemente obtido em trabalhos de secagem. Novamente, no início têm-se uma inclinação maior da curva de secagem e uma retirada mais intensa da umidade dos grãos, devido ao alto teor de umidade. A curva vai se tornando mais suave à medida que o processo de secagem ocorre, devido a uma menor quantidade de água superficial disponível.

FIGURA 5.14 – Diagrama da variação do teor de umidade médio do leito de grãos simulados para o secador de média dimensão.

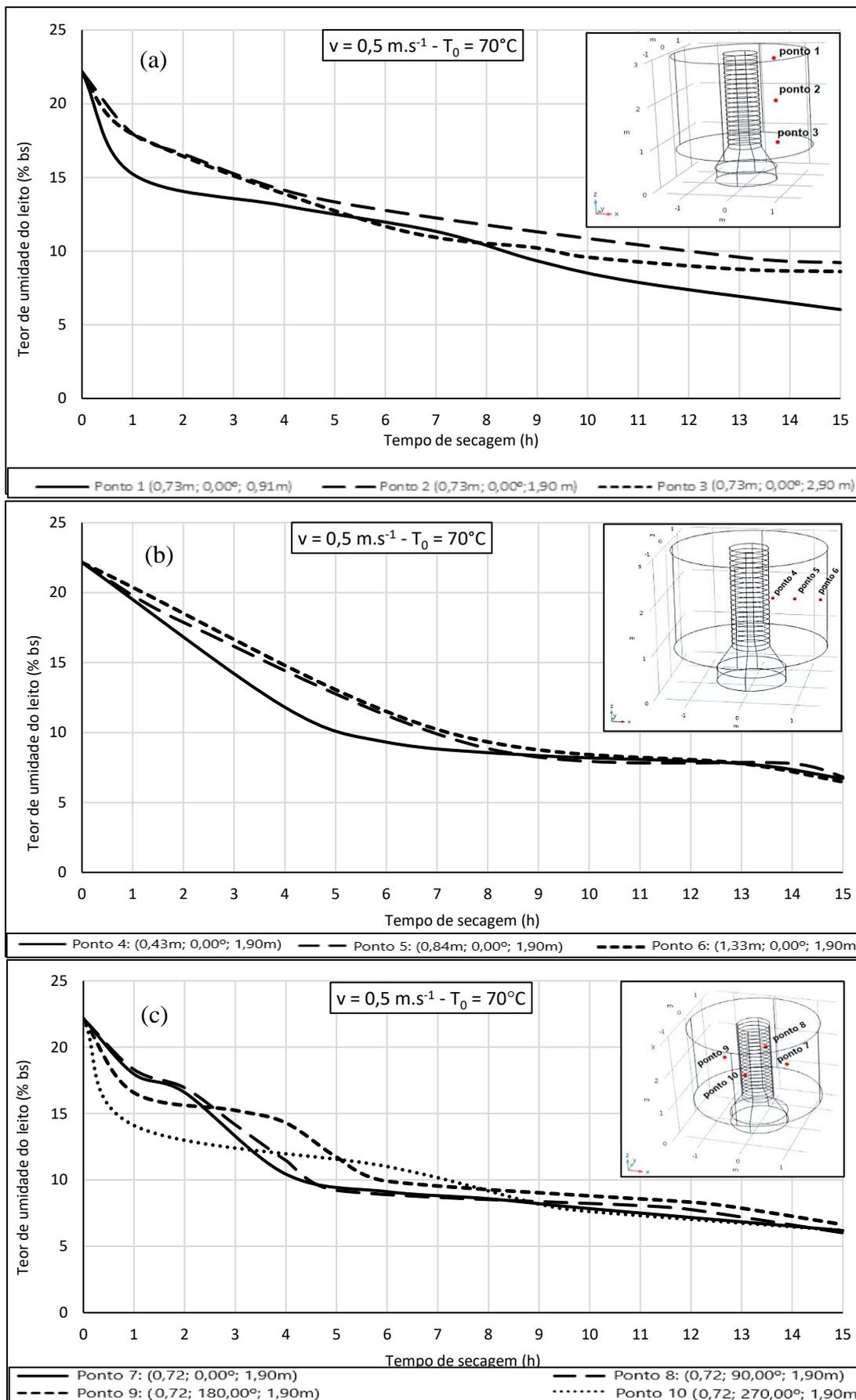


FONTE: Próprio autor.

Como pode ser visto, não ocorreram diferenças significativas entre os valores do teor de umidade obtidos a  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$  e a  $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ . Isto pode estar relacionado ao fato de que na temperatura de  $70^\circ\text{C}$  a quantidade de água evaporada dos grãos já é suficiente para saturar o ar ambiente. Desta forma o arraste do ar saturado pelo leito em alta velocidade não contribui para retirada de umidade adicional, uma vez que o tempo de contato com os grãos também é reduzido. Observa-se na curva, que um curto período de tempo, aproximadamente de 4 horas, é suficiente para o teor médio de umidade no leito atingir o valor de 12 %. Suficiente para permitir a armazenagem dos grãos de milho por longos períodos.

No FIG. 5.15, são mostradas as curvas para a variação do teor médio de umidade dos grãos com o tempo de secagem no interior do secador, ao longo das três dimensões consideradas no modelo. Foram utilizadas três posições para análise axial e radial, e quatro para a análise angular. Os dados numéricos foram obtidos na execução da simulação na temperatura de  $70^\circ\text{C}$  e velocidade de  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ .

FIGURA 5.15 – Diagramas da variação do teor médio de umidade do leito com o tempo de secagem. Dados obtidos da simulação em diferentes posições axial (a), radial (b) e angular (c) no secador de média dimensão.



FONTE: Próprio autor.

Conforme o FIG. 5.15a, observa-se uma variação significativa do teor de umidade com a altura ( $z$ ) do secador, e em geral, a região mais próxima à base (ponto 3) apresentou menor teor de umidade. Entretanto, na região de maior altura (ponto 1) mostrou menor teor de umidade em relação à região mediana (ponto 2). Isso foi observado durante a secagem dos grãos até atingir o teor de umidade de 12% (bs), sendo que os grãos localizados nos pontos 1, 2 e 3 necessitaram de 6, 8 e 6 horas, respectivamente, para atingir tal teor. Este comportamento está relacionado com o contato dos grãos com o ar quente. Em regiões mais baixas o contato é mais rápido, já em regiões mais elevadas há um acúmulo de ar devido à turbulência, causada pelo contato do ar quente com a tampa superior do duto central, ocasionando um aumento na pressão do ar.

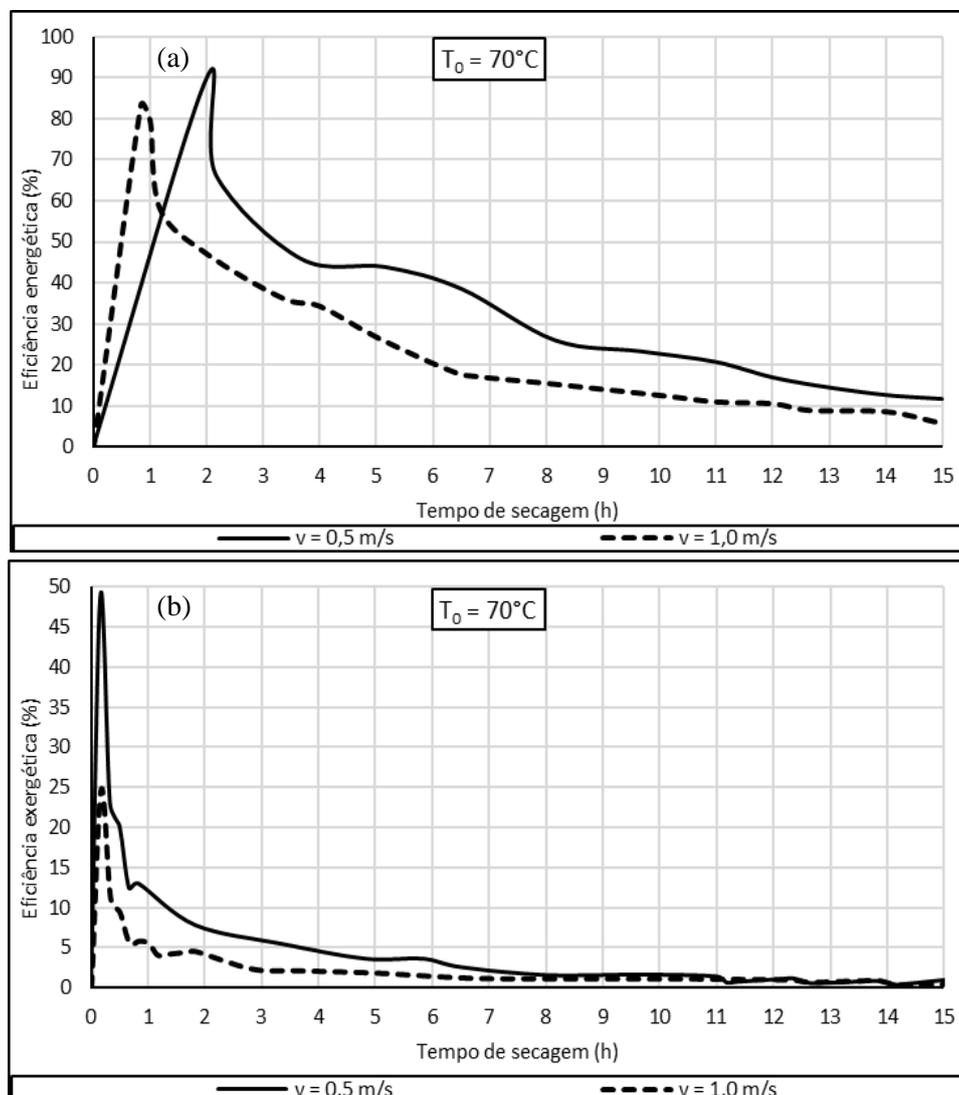
No FIG. 5.15b, observa-se uma variação radial do teor de umidade do leito com o tempo de secagem. De uma forma geral, regiões mais distantes do duto central mostram maior teor de umidade (pontos 5 e 6), já que o ar de secagem se torna mais saturado em umidade à medida que se aproxima da saída do secador. Novamente, para alcançar o teor de umidade de 12% (bs) os grãos na posição 4 necessitam de 4 horas de secagem, enquanto nos pontos 5 e 6 são necessárias 5,5 horas. Esta diferença de umidade entre os pontos é menos acentuada em tempos de secagem superiores a 8 horas, uma vez que a umidade dos grãos se aproxima da umidade de equilíbrio.

O teor de umidade do leito com o tempo de secagem também mostrou variações significativas com o ângulo no interior do secador cilíndrico, como mostrado no FIG. 5.15c. A análise foi realizada em quatro posições angulares (pontos 7, 8, 9 e 10) em um mesmo plano radial. Observou-se uma variação pequena no teor de umidade para os ângulos de 0 e 90° (pontos 7 e 8), já para os ângulos de 180 e 270° (pontos 9 e 10) pode chegar até a 4% bs para tempos de secagem inferiores a 4 horas, e torna-se menor para tempos de secagem maiores, conforme o teor de umidade aproxima-se do equilíbrio. Até atingir o teor de umidade de 12% (bs) foram necessárias aproximadamente: 3,5 horas para os pontos 7 e 10, 4 horas para o ponto 8 e 5 horas para o ponto 9. Estes resultados comprovam a não uniformidade da secagem do milho no interior do secador cilíndrico de médio porte, isto pode estar relacionado com a formação de caminhos preferenciais do ar e com a variabilidade da porosidade, no interior do leito de grãos. Desta forma, tentativas de simplificações do modelo matemático, tal como simetria na simulação, pode comprometer a qualidade, acarretar resultados insatisfatórios e não fidedignos ao sistema analisado. Estas considerações demonstram a utilidade do modelo tridimensional proposto neste trabalho.

As curvas de eficiência energética e exergética obtidas na simulação da secagem do milho no secador de média dimensão, em função do tempo de secagem, são mostradas no FIG. 5.16. Nestas curvas, observa-se um comportamento similar ao obtido na simulação em pequena escala (FIG. 5.12). Ocorreu um crescimento rápido das eficiências energética e exergética no início do processo, devido a uma grande quantidade de água livre (superficial) disponível no produto para evaporação. Após atingirem um pico as curvas de eficiência demonstraram uma tendência decrescente, devido a uma redução da água livre no milho e exaustão do calor para fora do secador.

Como pode ser visto no FIG. 5.16, a secagem do milho em velocidade mais baixa atingiu melhores valores de eficiência energética após aproximadamente 1,2 horas de secagem, e melhores valores de eficiência exergética ao longo de todo o tempo de simulação. Ao final de 4 horas de secagem, observa-se uma eficiência energética de aproximadamente 45% em  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$  e 35% em  $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ , valores superiores aos obtidos na secagem em pequena escala, que foram próximos de 25% (TAB. 5.4). Isto pode ser explicado pelo fato de que no secador em média escala têm-se um maior raio, logo o ar quente percorre uma maior extensão. Como resultado uma maior quantidade de água livre disponível na superfície dos grãos é removida, antes da exaustão. No mesmo tempo de secagem observou-se uma melhor eficiência exergética na velocidade mais baixa, aproximadamente 5%, valor duas vezes maior ao obtido na velocidade mais alta e maior ao obtido na secagem em pequena escala (TAB. 5.4).

FIGURA 5.16 – Diagramas da variação da eficiência energética (a) e exergética (b) simulados para o secador de média dimensão.



FONTE: Próprio autor.

Os resultados numéricos obtidos na simulação da secagem do milho em secador de médio porte, mostraram que teores de umidade próximos a 12% podem ser conseguidos em um tempo de secagem de 4 horas. A secagem usando a temperatura de  $70^\circ\text{C}$  e velocidade de  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para o ar na entrada do secador, mostrou melhores resultados de eficiências energética e exergética, além de maior economia de energia. Isto qualifica o uso do secador em pequenas e médias propriedades agrícolas.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho de tese foi desenvolvido o estudo da secagem de grãos de milho em secador cilíndrico com admissão radial do ar de secagem. O processo foi modelado por equações que descrevem as variações do teor de umidade e temperatura dos grãos, umidade absoluta e temperatura do ar de secagem. Equações auxiliares para a queda de pressão, umidade de equilíbrio e secagem em camada delgada foram estudadas e ajustadas à dados experimentais. As variações das propriedades físicas dos grãos de milho (massa específica, calor específico, área específica e porosidade) com os parâmetros de secagem foram determinadas experimentalmente. As equações obtidas foram incluídas na constituição do modelo matemático.

Foram construídas colunas de secagem em escala laboratorial para obtenção dos dados experimentais. O projeto de construção foi realizado com base em um secador de grandes dimensões em operação na EMBRAPA, que também forneceu o milho do cultivar BG 7640 VYH para a secagem. Observou-se que os aspectos das curvas de secagem foram similares aos obtidos por outros autores na literatura, permitindo concluir que as colunas construídas podem ser utilizadas para o estudo da secagem do milho.

As equações para a variação da massa específica, calor específico e porosidade com o teor de umidade do milho foram ajustadas experimentalmente, sendo obtidas curvas de regressão com coeficiente  $R^2$  mínimo de 0,97, demonstrando uma boa concordância dos dados.

Mediante experimentos realizados nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70°C, foi possível obter a umidade de equilíbrio. A análise dos resultados permitiu identificar uma equação polinomial de segunda ordem que se ajustou aos dados experimentais. A curva apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,997, e essa equação foi utilizada no modelo de secagem do milho em camada espessa.

A análise da secagem em camada delgada foi realizada nas temperaturas de 40, 50 e 60°C, e velocidades do ar de 0,5; 1,0 e 1,5 m.s<sup>-1</sup>. O tempo de secagem foi de 150 minutos. Todas as equações testadas apresentaram valores melhores quando ajustadas aos dados experimentais. O teste de  $\chi^2$  mostrou que os modelos ajustados representam bem a secagem ao nível de significância de 5%. Os modelos de Page, Midilli e Overhults mostraram ser os melhores após ajuste, com  $R^2$  iguais a 1,000, erros estimados e relativos menores que 0,01 (decimal) e 1%, respectivamente. O modelo de Page foi o escolhido para as simulações em camada espessa, devido o mesmo apresentar uma equação mais simples e com menos parâmetros.

A secagem experimental em camada espessa ocorreu nas mesmas temperaturas da camada delgada, entretanto, nas velocidades de 2,0 e 4,0 m.s<sup>-1</sup>. Foram obtidas amostras do teor de umidade médio e também em posições distintas dentro do leito de grãos, durante um tempo de secagem de 150 minutos. O teor médio de umidade do leito obtido para a secagem em temperaturas mais elevadas foi de até (14,00±0,09) % bs, adequado para a armazenagem do milho por até dois anos. Os resultados para a razão de umidade mostraram que para uma mesma velocidade um aumento na temperatura causou uma maior retirada de umidade. Enquanto para uma mesma temperatura um aumento na velocidade do ar causou uma redução menos significativa da umidade do leito. Isto evidenciou a necessidade de analisar os gradientes de temperatura e velocidade do ar durante as simulações. Para os copos foram obtidos teores de umidade entre (13,0±0,5) e (18,0±0,5) % bs, de acordo com as temperaturas de secagem. Os perfis de temperaturas para o leito de grãos e para 9 regiões distintas dentro do leito, mostraram que os grãos mais próximos ao duto central apresentaram maiores temperaturas e menores teores de umidade. Em geral, os grãos localizados mais no topo mostraram menores temperaturas e maiores teores de umidade. Estes resultados mostraram que considerações tridimensionais são significativas, e desta forma, foram analisadas nas simulações da secagem do milho em camada espessa.

Os resultados numéricos obtidos na simulação da secagem do milho no secador cilíndrico foram comparados com os dados experimentais para validação. As simulações executadas em camada espessa permitiram obter os perfis do teor médio de umidade dos grãos e da temperatura média do ar de secagem com o tempo. O fenômeno foi analisado nas temperaturas de 40, 50 e 60°C, e velocidades de 2,0 e 4,0 m.s<sup>-1</sup>, oferecendo condições de comparação com os dados experimentais para validação do modelo de secagem tridimensional proposto. Todas as curvas para o teor médio de umidade obtidas numericamente corroboraram com os experimentos, mostrando valores mínimos de R<sup>2</sup> iguais a 0,97 e valores de P iguais ou menores do que 5,00 %. Os resultados para a temperatura média do ar apresentaram valores para o desvio P entre 4 e 15%. Estes resultados permitem concluir que o modelo proposto descreve com precisão satisfatória o processo de secagem tridimensional do milho em secador cilíndrico com admissão radial do ar. Modelos com estas características não foram encontrados na literatura, evidenciando a importância deste trabalho.

A análise energética e exergetica do processo de secagem foi realizada numericamente após a validação do modelo. Os efeitos da variação da temperatura e velocidade do ar de secagem na eficiência do secador foram estudados, e a condição ideal de secagem foi determinada. Por meio do estudo realizado verificou-se, em geral, que um aumento na

velocidade do ar diminui os valores de eficiências energética e exergética, e um aumento na temperatura diminui a eficiência energética, porém aumenta a eficiência exergética no secador.

Além disto, os valores de eficiências dependem do tempo necessário para a secagem do milho até atingir o teor de umidade desejado, no caso 12% para armazenamento por longos períodos. Assim, foi determinado que a melhor condição de eficiência energética (24,3%) e exergética (2,3 e 3,0%), para secagem do milho no secador projetado, ocorre na temperatura de 70°C e velocidades de 0,5 e 1,0 m.s<sup>-1</sup> para o ar de admissão.

O modelo matemático validado foi aplicado em um secador de 2,9 m de diâmetro externo e 3,0 m de altura total. Foram executadas simulações na temperatura de 70°C e velocidades de 0,5 e 1,0 m.s<sup>-1</sup>, para o ar de secagem. Os resultados numéricos mostraram que não há distinção na curva de teor de umidade média com o tempo em diferentes velocidades, sendo obtido o teor de armazenamento de 12% após aproximadamente 4 horas de secagem. Foram observadas variações significativas do teor de umidade dos grãos em diferentes posições axial, radial e angulares, confirmando a necessidade de considerações tridimensionais no modelo. A análise de eficiências mostrou que o secador pode atingir valores de eficiências energética e exergética de aproximadamente 45% e 5%, respectivamente. Estes resultados indicam que o secador de médio porte proposto pode ser utilizado em pequenas e médias propriedades, visto que o mesmo proporciona a secagem dos grãos de milho em um tempo relativamente curto e uma economia de energia satisfatória.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O desenvolvimento deste trabalho de doutorado permitiu a análise do processo de secagem de grãos de milho em secador cilíndrico com admissão radial do ar de secagem. Entretanto, um estudo da melhoria contínua do processo como um todo deve ocorrer visando a manutenção da qualidade do produto final, e um uso eficiente da energia. Assim, para a realização de trabalhos futuros sugere-se:

1. Realizar uma análise detalhada dos custos de construção do secador cilíndrico de médio porte, com admissão radial do ar de secagem.
2. Construir um sistema de recirculação/desumidificação do ar de secagem que se adapte ao secador projetado, para reaproveitamento da energia exaurida durante o processo.
3. Utilizar outros materiais, tais como outros grãos, resíduos e frutas para verificação da aplicação do modelo de secagem proposto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-El-HANA, N.; YOUNIS, M. A. Pressure drop thought shelled corn as affected by airflow rates, moisture content and air temperature. **Misr. Journal of Agriculture Engineering**, v. 25, n. 3, p. 944–956, 2008.
- ALONSO, D. M. J. **Modeling of grain dryers: thin layers to deep beds**. 88 f. Thesis Master of Science. Montreal: McGill University, 2011.
- AMANTÉA, R. P.; FORTES, M.; MARTINS, J. H.; LUO, FERREIRA. W. R. Numerical Simulation Techniques for Optimizing Thermodynamic Efficiencies of Cereal Grain Dryers. **Drying Technology**, v. 31, p. 672 – 683, 2013.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME V&V20-2009: Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer**. New York, 2009.
- ASAE STANDARDS – S448. 1998. **Thin - Layer drying of grains and crops**. p. 581 – 583.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, p. 11, 2015.
- BALA, B. K. **Drying and storage of cereal grains**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2017, 354 p.
- BARRETO, A. A.; ABALONE, R.; GASTON, A. Mathematical modelling of momentum, heat and mass transfer in grains stored in silos. Part I: model development and validation. **Latin American Applied Research**, v. 43, p. 377-384, 2013.
- BENAMOUN, L.; BELHAMRI, A. Mathematical description of heat and mass transfer during deep bed drying: Effect of product shrinkage on bed porosity. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, p. 2236–2244, 2008.
- BORGES, F. B. **Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos**. 171 f. Tese de Doutorado. Campina Grande: UFCG 2016.
- BORGES, P. A. P. **Modelagem dos processos envolvidos nos sistemas de secagem e armazenamento de grãos**. 123 f. Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 2002
- BORTOLAIA, L. A. **Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo**. 161 f. Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- BOTELHO, F. M.; FARIA, B. M. E. M.; BOTELHO, S. C. C.; RUFFATO, S.; MARTINS, R. N. Metodologias para determinação de massa específica de grãos. **Revista Agrarian**, v. 11, n. 41, p. 251-259, 2018.

BRASIL. Lei nº 9.456, de 25 de abril de 1997. **Lei de proteção de cultivares**, Brasília,DF, abril 1997.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. MAPA. **Instrução Normativa Mapa nº 60**, de 23 de DEZEMBRO de 2011. Estabelecer o regulamento técnico do milho, 2011

BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399p.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying Cereal Grains**. 3. ed. Westport: AVI Publishing, 1981. 265p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL C. W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York: An AVI Book, 1992.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. São Paulo: Mcgraw-Hill, 3.ed., 2009, 906 p.

CHAYJAN, R. A.; PARIAN, J. A.; ESNA-ASHARI, M. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in a fixed and fluidized bed convective dryer. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 1, p. 28-40, 2011.

CHEN, C.; WU, P. C. Thin layer drying model for rough rice with high moisture content. **J. Agric Eng Res.**, v. 80, n. 1, p. 45-52, 2001.

CHUNG, T. J. **Computational fluid dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, 1022 p.

COMINI, G.; LEWIS, R. W. A numerical solution of two-dimensional problems involving heat and mass transfer. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 19, p. 1387-1392, 1976.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira grãos. **Observatório agrícola**, v. 10, safra 2022/23, n. 8, oitavo levantamento agrícola, p. 1-106, 2023.

CORREA, C.E.S.; SHAVER, R.D.; PEREIRA, M.N., LAUER, J.G., KOHN, K. Relationship between corn vitreousness and ruminal in situ starch degradability. **Journal of Dairy Science**, v.85, n.11, p.3008-3012, 2002.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Isotermas de sorção das espigas de milho: obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.4, n.1, p.126-134, 2005

COSTABILE, L. T. **Estudo sobre as perdas de grãos na colheita e pós colheita**. 157 f. Tese de Doutorado. São Paulo: UNIP, 2017

DA COSTA, L. A.; DE SOUZA, J. L. F.; Huebner, R.; FILHO, F. A. R.; DIAS, A. A. Finite element simulation and experimental validation of the variations of temperature and moisture content in unsteady-state drying of corn in a fixed bed. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol. 45, nº 1, p. 1-13, 2023.

DANTAS, L. A.; MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M. Programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes de milho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n. 3, p. 311 – 320, 2011.

DE VRIES, D. A. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 30, p. 1343–1350, 1987.

DIAS, A. A. **Análise Experimental da secagem do milho em secador de grãos de leito fixo em escala laboratorial**. 2019. 231f. Dissertação (Engenharia Mecânica) - CEFET - MG, Belo Horizonte. 2019.

DIMITRIADIS, A. N.; AKRITIDIS, C. B. A model to simulate chopped alfalfa drying in a fixed deep bed. **Drying Technology**, v. 22, p. 479 – 490, 2004.

DINÇER, I.; ZAMFIRESCU, C. **Drying phenomena: theory and applications**. Chichester: John Wiley & Sons Ltda, 2016, 511 p.

DODER, D. D.; DJAKOVIĆ, D. D. Modeling of intermittent convective drying of walnuts in single layer and its influence on deep bed drying simulation. **Thermal Science**, v. 23, p. 3687 – 3699, 2019.

DOYMAZ, I. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. **Heat Mass Transfer**, v. 53, p. 25 – 35, 2017.

ELGAMAL, R. A.; KISHK, S. S.; ELMASRY, G. M. Validation of CFD models for the deep-bed drying of rice using thermal imaging. **Biosystems Engineering**, v. 161, p. 135-144, 2017.

ELIAS, M. C. **Secagem e armazenamento de grãos de milho e sorgo na propriedade rural**. In: PARFITT, J. M. B. (Coord.). Produção de milho e sorgo em várzea. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2000. p. 107-146.

ELIAS, M. C.; M.; VANIER, N. L.; FERREIRA, C. D. **Tecnologias de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos**. Capão do Leão: UFPel, 2017. 102 p.

EMBRAPA. Cultivo do milho. **Sistemas de Produção Embrapa**, 9º ed., v. 1, 2015.

ENDICOTT, S.; BRUELAND, B.; KEITH, R.; SCHON, R.; BREMER, C.; FARNHAM, D.; DEBRUIN, J.; CLAUSEN, C.; STRACHAN, S. **Corn grow and development**, Iowa: DuPont Pioneer, 2015, 20 p.

FAORO, V. **Modelagem matemática e otimização do fluxo de ar em armazéns graneleiros**. 132 f. Tese de Doutorado. Ijuí: UNIJUÍ, 2018.

FORTES, M.; OKOS, M. R. **Drying theories: Their basis and limitations as applied to foods and grains**. In: MUJUMDER, A.S., Ed., *Advances in Drying*, 1, Hemisphere, Washington DC, 1980, p. 119-154.

FRANÇA, A. S.; FORTES, M.; HAGHIGHI, K. Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials. **Drying Technology**, v. 12, p. 1537 – 1560, 1994.

GARCIA, J. C.; MATTOSO, M. J.; DUARTE, J. O.; CRUZ, J. C. **Aspectos econômicos da produção e utilização do milho**. Sete Lagoas: Embrapa, 2006. 12 p. (Circular Técnica, 74).

GLASS, S. V.; BOARDMAN, C. R.; THYBRING, E. E.; ZELINKA, S. L. Quantifying and reducing errors in equilibrium moisture content measurements with dynamic vapor sorption (DVS) experiments. **Wood Science Technology**, vol. 52, p. 909-927, 2018.

GÓRNICKI, K. e KALETA, A. Resistance of bulk grain to airflow – a review. Part I: Equations for airflow resistance. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture (Agricultural and Forest Engineering)*, v. 65, p. 31–41, 2015.

GRAY, G. L.; COSTANZO, F.; PLESHA, M. E. **Mecânica para engenharia: dinâmica**. São Paulo: Bookman, 2014, 780 p

HARCHEGANI, M. T.; MOHEB, A.; SADEGHI, M.; TOHIDI, M.; NAGHAVI, Z. Experimental study of deep-bed drying kinetics of rough rice. **Agric Eng Int: CIGR Journal**, v. 14, n. 4, p. 195–202, 2012.

HEMIS, M.; SINGH, C. B.; JAYAS, D. S. Microwave-assisted thin layer drying of wheat. **Drying Technology**, v. 29, p. 1240 – 1247, 2011a.

HEMIS, M.; SINGH, C. B.; JAYAS, D. S.; BETTAHAR, A. Simulation of coupled heat and mass transfer in granular porous media: application to the drying of wheat. **Drying Technology**, v. 29, p. 1267 – 1272, 2011b.

HII, C.L.; LAW, C.L.; CLOKE, M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. **Journal of Food Engineering**, v. 90, p. 191-198, 2009.

HUKILL, W. V. Drying of grain. In: Cristensen, C.M. Ed. Storage of cereal grains and their products. 2 Ed. St. Paul, Minn. **American Society of Cereal Chemists**, p. 481-508, 1974.

HUSSAIN, M. M.; DINCER, I. Analysis of two-dimensional heat and moisture transfer during drying of spherical objects. **International Journal of Energy Research**, v. 27, p. 703–713, 2003.

HUSSAIN, M. M.; DINCER, I. Numerical analysis of two-dimensional heat and mass transfer during drying of cylindrical moist solids. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 27, p. 137–148, 2002.

JIANG, J.; DANG, L.; YUENSIN, C.; TAN, H.; PAN, B.; WEI, H. Simulation of microwave thin layer drying process by a new theoretical model. **Chemical Engineering Science**, v. 162, p. 69 – 76, 2017.

JOHANN, G.; SILVA, E. A.; PEREIRA, N. C. Modelling and optimisation of grape seed drying: Equivalence between the lumped and distributed parameter models. **Biosystems Engineering**, v. 176, p. 26-35, 2018.

KALBASI, M. Heat and moisture transfer model for onion drying. **Drying Technology**, v. 21, p. 1575 – 1584, 2003.

KAYA, A.; AYDIN, O.; DINCER I. Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa* Planch). **Journal of Food Engineering**, v. 88, p. 323–330, 2008a.

KAYA, A.; AYDIN, O.; DINCER I. Heat and mass transfer modelling of recirculating flows during air drying of moist objects for various dryer configurations. **Numerical Heat Transfer, Part A**, v. 53, p. 18–34, 2008b.

KAYA, A.; AYDIN, O.; DINCER I. Numerical modeling of forced-convection drying of cylindrical moist objects. **Numerical Heat Transfer, Part A**, v. 51, p. 843–854, 2007.

KAYA, A.; AYDIN, O.; DINCER, I. Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 49, p. 3094–3103, 2006.

KHANCHI, A. E BIRRELL, S. Drying models to estimate moisture change in switchgrass and corn stover based on weather conditions and swath density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237 - 238, p. 1 - 8, 2017.

KHANCHI, A.; JONES, C. I.; SHARMA, B.; HUHNKE, R. L.; WECKLER, P.; MANESS, N. O. An empirical model to predict infield thin layer drying rate of cut switchgrass. **Biomass and bioenergy**, v. 58, p. 128 - 135, 2013.

KHATCHATOURIAN, O. A. Experimental study and mathematical model for soya bean drying in thin layer. **Biosystems engineering**, v.113, p. 54 - 64, 2012.

KUCUK, H.; MIDILLI, A.; KILIC, A.; DINCER I. A review of thin-layer drying curve equations. **Drying Technology**, v.32, p.757–773, 2014

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Stoneham: Butterworth-Heinemann, 1991. 491p.

LAMBERT, C.; CARTAILLER, J.; ROUCHOUSE, S.; ALMEIDA, G.; COURTOIS, F. Characterization and modeling of cooling and drying of pellets for animal feed. **Drying Technology**, v. 36, p. 255 – 266, 2018.

LECORVAISIER, E.; DARCHE, S.; SILVA, Z. E.; SILVA, C. K. F. Theoretical model of a drying system including turbulence aspects. **Journal of Food Engineering**, v. 96, p. 365–373, 2010.

LEWIS, L.W. The rate of drying of solid materials. **Industrial Engineering Chemistry**, v.13, n. 5, p. 427-432. 1921.

- LE-XIU, S.; SHUANG-XI, L.; JIN-XING, W.; CHENG-LAI, W.; YAN, L.; CHUN-QING, Z. The effects of grain texture and phenotypic traits on the thin-layer drying rate in maize (*Zea mays* L.) inbred lines. **Journal of Integrative Agriculture**, v.15, n.2, p. 317–325, 2016.
- LIU, Z.; WU, Z.; WANG, X.; JIA SONG, J.; WU, W. Numerical simulation and experimental study of deep bed corn drying based on water potential. Hindawi publishing Corporation, **Mathematical problems in engineering**, v. 2015, Article ID 539846, 13 p., 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2015/539846>>. Acesso em: 10 Maio de 2019.
- LUIKOV, A. V. On thermal diffusion of moisture. **Russian Journal of Applied Chemistry**, v. 8, p. 1354–1364, 1934.
- LUIKOV, A. Z. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 18, p. 1-14, 1975.
- MAIA, G. B. S.; PINTO, A. R.; MARQUES, C. Y. T.; LYRA, D. D.; ROITMAN, F. B. Panorama da armazenagem de produtos agrícolas no Brasil. **Revista do BNDES**, nº 40, p.161-194, 2013.
- MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Certificação dos Armazéns**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 18 abril de 2019.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, p.1503–1513, 2002.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 4. Ed., 2009, 464 p.
- MUJUMDAR, A. S. An overview of innovation in industrial drying: Current status and R&D needs. **Transport in Porous Media**, vol. 63, p. 3-18, 2007.
- NEJADI, J. e NIKBAKHT, A. M. Numerical simulation of corn drying in a hybrid fluidized bed-infrared dryer. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, p. 1 - 13, 2016.
- OKUNOLA, A.; ADEKANYE, T.; IDAHOSA, E. Energy and exergy analyses of okra drying process in a forced convection cabinet dryer. **Research in Agricultural Engineering**, vol. 67, p. 8-16, 2021.
- OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; THAÍS ADRIANA DE SOUZA SMANIOTTO, T. A. S.; CAMPOS, R. C.; TARCÍSIO HONÓRIO CHAVES, T. H. Cinética de secagem dos grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.11, n. 2, p. 190-201, 2012.
- OLIVEIRA, D. E. C.; SANTOS, M. N. S.; RUFATTO, S. Forma e tamanho dos grãos de milho da cultivar P3646 submetidos a diferentes condições de ar de secagem. **Nativa**, v. 02, n. 03, p. 162-165, 2014.

OVERHULTS, D. D.; WHITE, G. M.; HAMILTON, M. E.; ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. Transactions of the ASAE. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 16, n. 2, p. 195-200, 1973.

OZALP, A. A.; DINCER, I. Hydrodynamic-thermal boundary layer development and mass transfer characteristics of a circular cylinder in confined flow. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, p. 1799–1812, 2010.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. MS Thesis – Purdue University, West Lafayette, 1949.

PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review. **J. Agric. Eng.**, v. 32, n. 1, p. 1-29, 1985.

PEREIRA FILHO, I. A.; BORGHI, E. **Sementes de milho no Brasil: a dominância dos transgênicos**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. 29 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 223).

PERES, J.R., 2001. **A dureza do grão de milho pode influenciar seu aproveitamento pelo animal**. Disponível em: <[http://www.milkpoint.com.br/radar\\_tecnico/nutricao/adureza-do-grao-de-milho-pode-influenciar-seu-aproveitamento-pelo-animal\\_15869n.aspx](http://www.milkpoint.com.br/radar_tecnico/nutricao/adureza-do-grao-de-milho-pode-influenciar-seu-aproveitamento-pelo-animal_15869n.aspx)>. Acesso em: 12 de abril de 2019.

PERES, J.R., 2003. **Textura do grão define qualidade de híbridos do milho para ensilagem**. Disponível em: <<https://www.milkpoint.com.br/artigos/producao/textura-do-grao-define-qualidade-de-hibridos-do-milho-para-ensilagem-15945n.aspx>>. Acesso em: 12 de abril de 2019.

PERRÉ, P.; MAY, B. K. A numerical drying model that accounts for the coupling between transfers and solid mechanics. Case of highly deformable products. **Drying Technology**, v. 19, p. 1629–1643, 2001.

PERRÉ, P.; TURNER, I. W. A heterogeneous wood drying computational model that accounts for material property variation across growth rings. **Chemical Engineering Journal**, v. 86, p. 117–131, 2002.

PHILIP, J. R.; DE VRIES, D. A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. **Transactions of the American Geophysics Union**, v. 46, p. 222–232, 1957.

PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L. **Secagem de grãos**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2001. 192p.

PRAKASH, B. e SIEBENMORGEN, T. J. Single-parameter thin-layer drying equations for long-grain rice. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 61, n. 2, p. 733 – 742, 2018.

RANJAN, R.; IRUDAYARAJ, J.; MAHAFFY, J. Modeling simultaneous heat and mass transfer using the control-volume method. **Numerical Heat Transfer, Part B**, v. 41, p. 463–476, 2002.

RANJBARAN, M.; EMADI, B.; ZARE, D. CFD simulation of deep-bed paddy drying process and performance. **Drying Technology**, vol. 32, p. 919-934, 2014.

RANJBARAN, M.; ZARE, D. Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. **Energy**, vol. 59, p. 484-493, 2013.

RANJBARAN, M.; ZARE, D. CFD Modeling of microwave-assisted fluidized bed drying of moist particles using two-fluid model. **Drying Technology**, v. 30, p. 362–376, 2012.

RIBEIRO, V. S.; SOBRAL, M. C.; AMEIDA, M. M.; SILVA, G. F. Propriedades físicas de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 4, n. 1, p. 1-6, 2002.

ROCHA, K. S. O. **Modelagem e simulação do processo de resfriamento de grãos armazenados em silos graneleiros por meio das leis de conservação de energia e massa**. 177 f. Tese de Doutorado. Viçosa: UFV, 2012.

SAHNI, E. K.; CHAUDHURI, B. Contact drying: A review of experimental and mechanistic modeling approaches. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 434, p. 334-348, 2012.

SHARON, M.; PRIYA, E. P.; SUBHASHINI, S. Thin layer and deep bed drying basic theories and modelling: a review. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 18, n. 1, p. 314-325, 2016.

SHEDD, C. K. Resistance of grains and seeds to airflow. **Agricultural Engineering**, v. 34, n. 9, p. 616–619, 1953.

SILVA, J.S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. 2.ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008, 560 p.

SMANIOTTO, T. A. S.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; kelly aparecida de SOUSA, K. A.; CAMPOS, R. C. Isotermas e calor latente de desorção dos grãos de milho da cultivar ag 7088. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.11, n.3, p. 312-322, 2012.

SOUZA, C. M. A; QUEIROZ, D. M. FILHO, A. F. L. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 4, p. 653 – 660, 2002

SOUZA, G. F. M. V. **Secagem de sementes de soja em leito fixo: equilíbrio e cinética da sílica gel para controle de umidade, modelagem do processo e análise da qualidade das sementes**. 172 f. Tese de Doutorado. Uberlândia: UFU, 2013

SOUZA, G. F. M. V.; MIRANDA, R. F.; LOBATO, F. S.; BARROZO, M. A. S. Simultaneous heat and mass transfer in a fixed bed dryer. **Applied Thermal Engineering**, vol. 90, p. 38-44, 2015.

SOUZA, J. L. F. S. **Simulação de secador cilíndrico de grãos com fluxos radial e axial de ar**. 1996. 107f. Dissertação (Engenharia Mecânica) - UFMG, Belo Horizonte. 1996

SOUZA, S. R. **Beneficiamento e análise de qualidade de grãos de milho e soja na fazenda campo bom**. 84 f. Tese de Doutorado. Florianópolis: UFSC, 2012.

TANG, Z.; CENKOWSKI, S.; MUIR, W. E. Modelling the superheated-steam drying of a fixed bed of brewers' spent grain. **Biosystems Engineering**, v. 87, p. 67 – 77, 2004.

TEJADA-ORTIZOGA, V.; WELTI-CHANES, J.; CAMPANELLA, O. H.; PELEG, M. Estimating equilibrium moisture content from relatively short sorption experiments. **LWT-Food Science and Technology**, v. 132, p. 1 – 7, 2020.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical Simulation of Corn Drying – a New Model. **Transaction of the ASAE**, vol. 11, p. 582-586, 1968.

TOLENTINO, E. L. **Análise energética e exergetica da secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando o modelo CFD**. 2018. 106f. Dissertação (Engenharia da Energia) – CEFET-MG, Belo Horizonte. 2018.

VITORINO, R. B. **Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho**. 60 f. Dissertação de Mestrado. Dourados: UFGD, 2009.

WANG, D. C.; FON, D. S.; FANG, W. Development of SAPGD – a simulation *software* regarding grain drying. **Drying Technology**, vol. 22, n. 3, p. 609-625, 2004.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Canoas, RS: Editora Salles, 2005, 586 p.

YI, X. K.; WU, W. F.; Zhang, Y. Q.; LI, J. X.; LUO, H. P. J. Thin-Layer Drying Characteristics and Modeling of Chinese Jujubes. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2012, ID 386214, 18 pages, doi:10.1155/2012/386214, 2012.

ZADHOSSEIN, S.; ABBASPOUR-GILANDEH, Y.; KAVEH, M.; KALANTARI, D.; KHALIFE, E. Comparison of two artificial intelligence methods (ANNs and ANFIS) for estimating the energy and exergy of drying cantaloupe in a hybrid infrared-convective dryer. **Journal of Food Processing and Preservation**, vol. 46: e16836, p. 1-17, 2022.

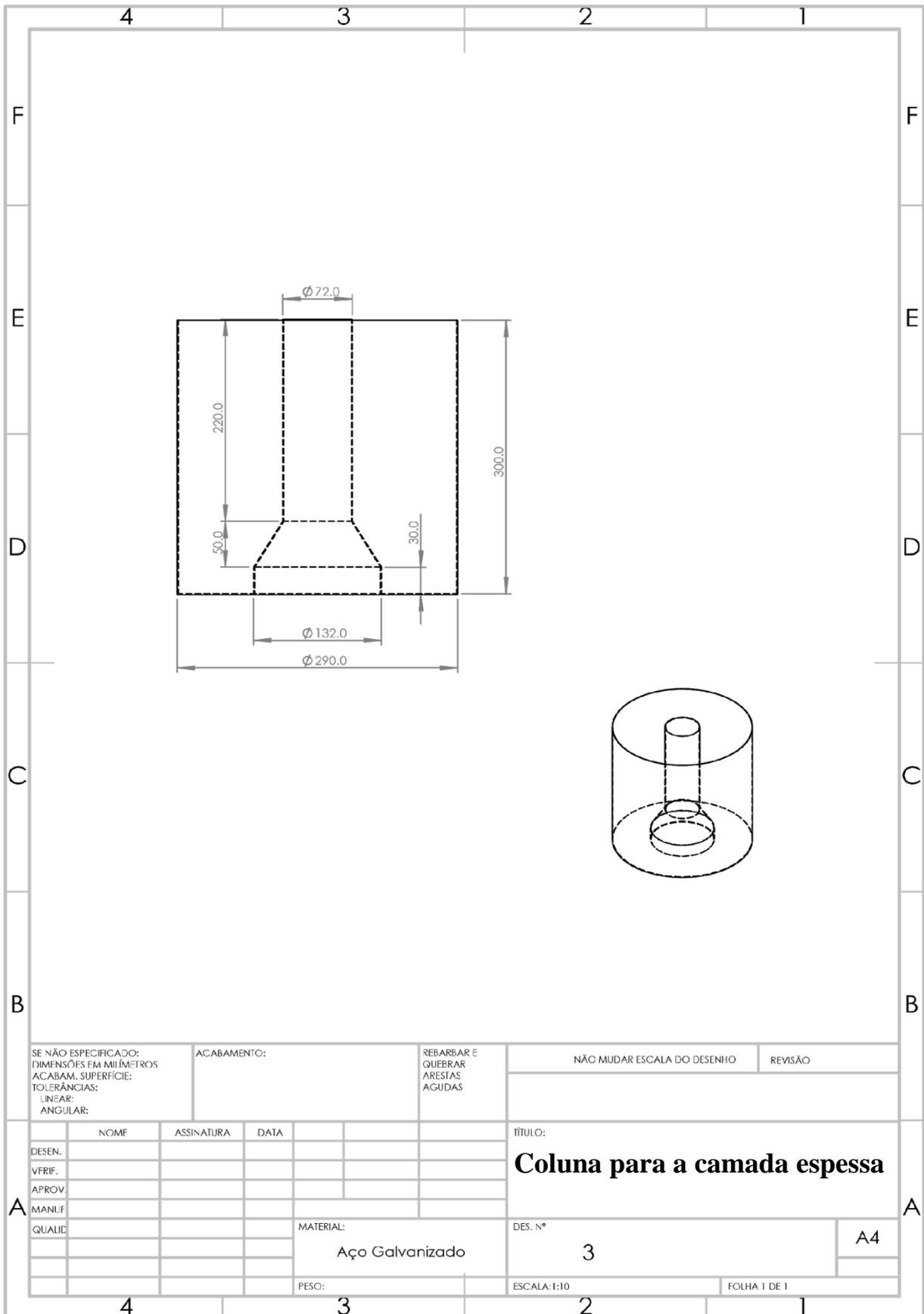
ZARE, D.; CHEN, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, p. 78–87, 2009.

ZHANG, S.; KONG, N.; ZHU, Y.; ZHANG, Z.; XU, C. 3D Model-based simulation analysis of energy consumption in hot air drying of corn kernels. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, article ID 579452, 12 pages, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2013/579452>>. Acesso em: 10 maio de 2019.

ZHAO, Y.; HUANG, K.; CHEN, X. F.; WANG, F. H.; CHEN, P. X.; TU, G.; YANG, D. Y. Tempering-drying simulation and experimental analysis of corn kernel. **International Journal of Food Engineering**, v. 14, n. 1, 2018.



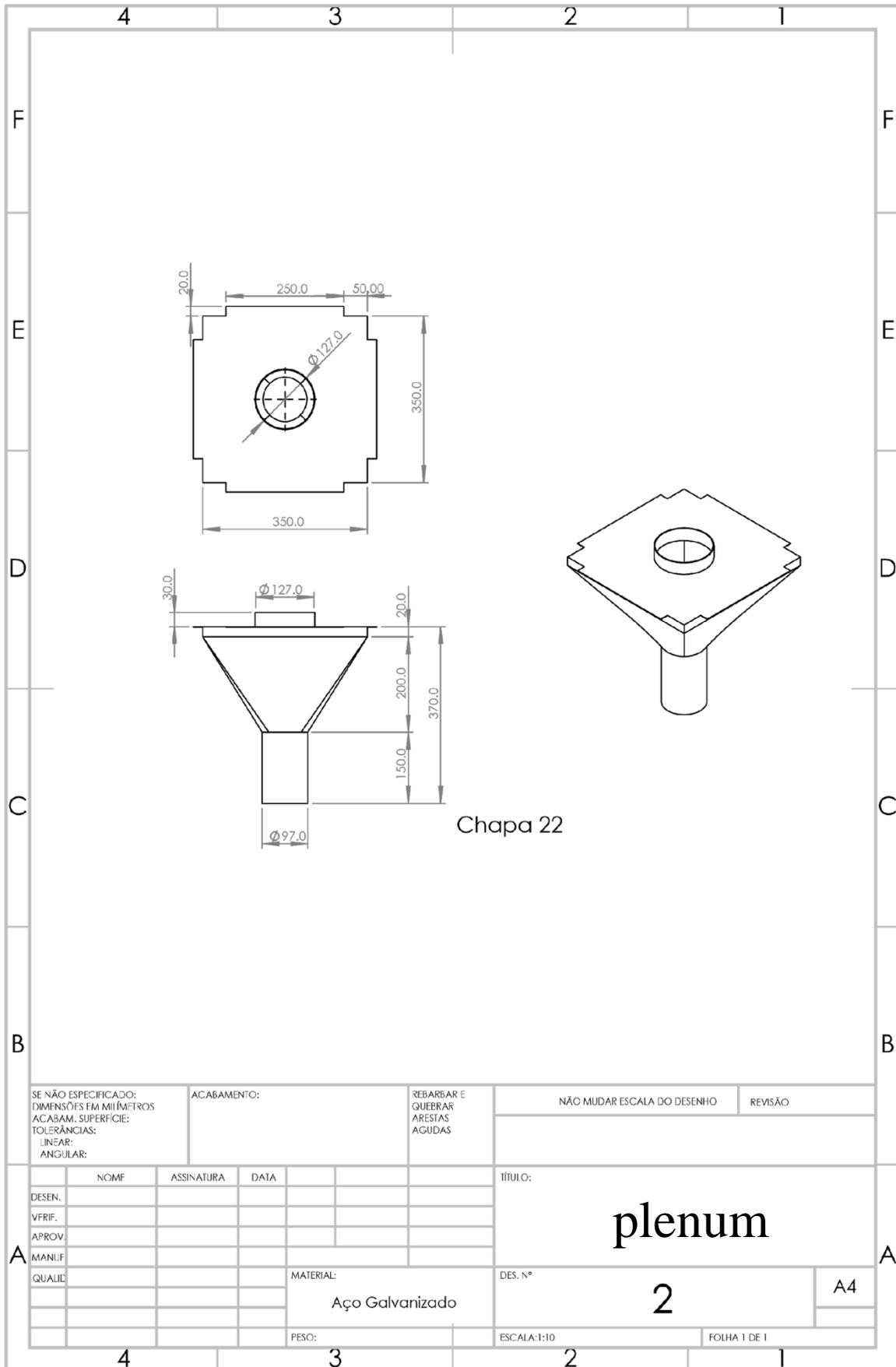
**A.2 Coluna de secagem em camada espessa**



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: <b>Coluna para a camada espessa</b>	
VFRIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID				MATERIAL: Aço Galvanizado	DES. Nº 3
				PESO:	3
				ESCALA:1:10	FOLHA 1 DE 1

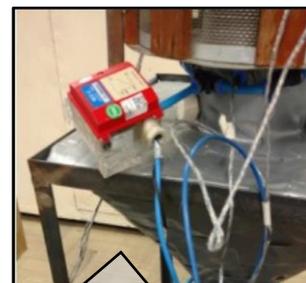
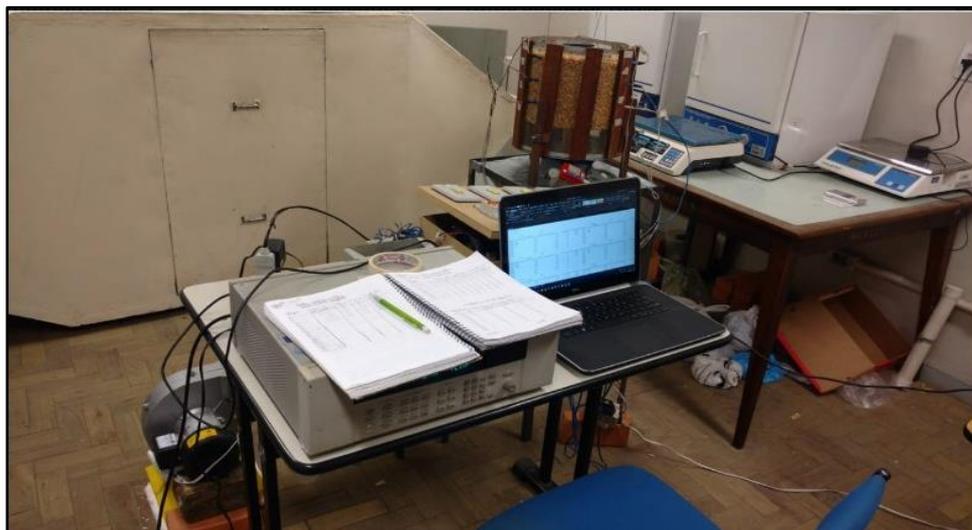
A4

**A.3 Câmara de distribuição do ar – plenum**



## APÊNDICE B – Fotos dos equipamentos de secagem

### B.1 Secagem em camada espessa



## APÊNDICE C – Resultados da análise de variâncias

### C.1 ANOVA para o parâmetro k do modelo de Page

1	RESUMO DOS RESULTADOS								
2									
3	<i>Estatística de regressão</i>								
4	R múltiplo	0,966922103							
5	R-Quadrado	<b>0,934938353</b>							
6	R-quadrado ajustado	0,913251138							
7	Erro padrão	0,049052429							
8	Observações	9							
9									
10	ANOVA								
11		<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>			
12	Regressão	2	0,207458014	0,103729007	43,11011477	<b>0,000275407</b>			
13	Resíduo	6	0,014436845	0,002406141					
14	Total	8	0,221894859						
15									
16		<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
17	Interseção	1,918631226	0,109073506	17,59025911	<b>2,16656E-06</b>	1,651737972	2,185524479	1,651737972	2,185524479
18	Temperatura (°C)	-0,018562407	0,002002557	-9,26935244	<b>8,91228E-05</b>	-0,023462488	-0,013662326	-0,02346249	-0,013662326
19	Velocidade (m/s)	0,021912582	0,040051141	0,54711504	<b>0,604037161</b>	-0,07608903	0,119914193	-0,07608903	0,119914193

### C.2 ANOVA para o parâmetro n do modelo de Page

1	RESUMO DOS RESULTADOS								
2									
3	<i>Estatística de regressão</i>								
4	R múltiplo	0,505240765							
5	R-Quadrado	<b>0,255268231</b>							
6	R-quadrado ajustado	0,007024307							
7	Erro padrão	0,020616136							
8	Observações	9							
9									
10	ANOVA								
11		<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>de significação</i>			
12	Regressão	2	0,000874103	0,000437	1,028295989	<b>0,413047162</b>			
13	Resíduo	6	0,00255015	0,000425					
14	Total	8	0,003424254						
15									
16		<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
17	Interseção	0,610425492	0,04584226	13,31578	<b>1,10956E-05</b>	0,498253522	0,722597462	0,498253522	0,722597462
18	Temperatura (°C)	-0,00052798	0,00084165	-0,62732	<b>0,553558028</b>	-0,002587426	0,001531462	-0,002587426	0,001531462
19	Velocidade (m/s)	-0,02170782	0,016833005	-1,2896	<b>0,244666302</b>	-0,062896694	0,019481063	-0,062896694	0,019481063

### C.3 ANOVA para o parâmetro As da equação de Shedd

RESUMO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E A DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO PARA O PARÂMETRO A								
<b>Estatística de regressão</b>								
R múltiplo	0,97552	Equação						
R-Quadrado	0,95163	(-)ln As =	10,1128	+	-12,2314	*Ms	+	-0,02721 *T
R-quadrado	0,94088	ln As =	-10,1128	+	12,2314	*Ms	+	0,02721 *T
Erro padrão	0,12146	<b>As = exp(-10,1128+12,2314*Ms+0,02721*T)</b>						
Observações	12							
<b>ANOVA</b>								
	gl	SQ	MQ	F	F de significação			
Regressão	2	2,61207	1,30604	88,5367	1,20368E-06			
Resíduo	9	0,13276	0,01475					
Total	11	2,74484						
<b>Parametros do modelo</b>								
interseção	10,1128							
Ms	-12,2314							
T	-0,02721							
	Coefficiente:	erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	10,1128	0,30536	33,117	1E-10	9,421983723	10,80355017	9,4219837	10,80355017
Ms	-12,2314	1,04532	-11,7012	9,5E-07	-14,59612142	-9,866767471	-14,59612	-9,866767471
T	-0,02721	0,00429	-6,33691	0,00013	-0,036925152	-0,017497348	-0,036925	-0,017497348

### C.4 ANOVA para o parâmetro B da equação de Shedd

RESUMO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E A DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO PARA O PARÂMETRO B								
<b>Estatística de regressão</b>								
R múltiplo	0,96607							
R-Quadrado	0,933291							
R-quadrado ajustado	0,918467							
Erro padrão	0,01986							
Observações	12							
<b>Parametros do modelo</b>								
parametro da interseção	1,31471							
parametro de Ms	-1,722							
parametro de T	-0,00347							
<b>Equação para B</b>								
<b>B = 1,31471 - 1,722*Ms - 0,00347*T</b>								
<b>ANOVA</b>								
	gl	SQ	MQ	F	F de significação			
Regressão	2	0,049664054	0,024832	62,95717	5,11481E-06			
Resíduo	9	0,003549846	0,000394					
Total	11	0,0532139						
	Coefficiente:	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	1,31471	0,049932875	26,32955	7,94E-10	1,201753988	1,427666012	1,201753988	1,427666012
Ms	-1,722	0,170929341	-10,0743	3,36E-06	-2,108669032	-1,335330968	-2,108669032	-1,335330968
T	-0,00347	0,000702164	-4,94187	0,0008	-0,005058405	-0,001881595	-0,005058405	-0,001881595

### C.5 Testando as equações de As e B na equação de Shedd

Dados experimentais				Dados modelados				Dados estatísticos	
dP/dx	v	Ms	T	As	B	dP/dx	erro (%)	coeficiente de determinação	
103	0,08	0,25	40	0,00256	0,74541	101	1,84		R <sup>2</sup> = 0,991
240	0,16	0,25	40	0,00256	0,74541	256	6,76		
451	0,24	0,25	40	0,00256	0,74541	441	2,13	erro medio relativo (%)	
118	0,08	0,22	40	0,00178	0,79707	119	0,66		
275	0,16	0,22	40	0,00178	0,79707	283	3,06	P= 4,86	
481	0,24	0,22	40	0,00178	0,79707	471	2,00		
137	0,08	0,19	40	0,00123	0,84873	137	0,11		
299	0,16	0,19	40	0,00123	0,84873	310	3,57		
505	0,24	0,19	40	0,00123	0,84873	499	1,12		
152	0,08	0,16	40	0,00085	0,90039	155	2,05		
314	0,16	0,16	40	0,00085	0,90039	335	6,67		
535	0,24	0,16	40	0,00085	0,90039	525	1,78		
93	0,08	0,25	50	0,00336	0,71071	86	7,13		
216	0,16	0,25	50	0,00336	0,71071	229	6,04		
414	0,24	0,25	50	0,00336	0,71071	405	2,12		
113	0,08	0,22	50	0,00233	0,76237	103	8,57		
245	0,16	0,22	50	0,00233	0,76237	256	4,68		
461	0,24	0,22	50	0,00233	0,76237	437	5,30		
128	0,08	0,19	50	0,00162	0,81403	121	5,61		
Dados experimentais				Dados modelados				Dados estatísticos para avaliação do modelo	
dP/dx	v	Ms	T	As	B	dP/dx	erro (%)	coeficiente de determinação	
284	0,16	0,19	50	0,00162	0,81403	283	0,32		R <sup>2</sup> = 0,991
495	0,24	0,19	50	0,00162	0,81403	466	5,89	erro medio relativo (%)	
147	0,08	0,16	50	0,00112	0,86569	139	5,67		P= 4,86
299	0,16	0,16	50	0,00112	0,86569	309	3,28		
515	0,24	0,16	50	0,00112	0,86569	493	4,22		
74	0,08	0,25	60	0,00442	0,67601	73	1,89		
196	0,16	0,25	60	0,00442	0,67601	202	3,28		
402	0,24	0,25	60	0,00442	0,67601	369	8,27		
93	0,08	0,22	60	0,00306	0,72767	89	4,64		
210	0,16	0,22	60	0,00306	0,72767	230	9,47		
432	0,24	0,22	60	0,00306	0,72767	401	7,09		
118	0,08	0,19	60	0,00212	0,77933	105	10,60		
236	0,16	0,19	60	0,00212	0,77933	257	8,78		
461	0,24	0,19	60	0,00212	0,77933	432	6,30		
137	0,08	0,16	60	0,00147	0,83099	123	10,37		
263	0,16	0,16	60	0,00147	0,83099	283	7,52		
490	0,24	0,16	60	0,00147	0,83099	461	5,99		

## APÊNDICE D – Resultados experimentais e simulados

### D.1 Resultados experimentais para as propriedades físicas do milho – porosidade, massa específica e calor específico

Teor de umidade do milho (%bs)	amostra	Volume da proveta (ml)	massa da proveta (g)	massa de milho (g)	volume da bureta (mL)	porosidade do leite	massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )
24,8	1	250,000	201,943	180,212	101,9	0,41	720,85	1216,83
	2	250,000	201,943	183,960	99,1	0,40	735,84	1219,09
	3	250,000	201,943	186,883	99,0	0,40	747,53	1237,64
21,0	1	250,000	201,943	192,635	94,5	0,38	770,54	1238,81
	2	250,000	201,943	193,810	95,2	0,38	775,24	1252,00
	3	250,000	201,943	194,259	94,8	0,38	777,04	1251,67
17,0	1	250,000	201,943	198,562	91,6	0,37	794,25	1253,55
	2	250,000	201,943	197,776	91,8	0,37	791,10	1250,16
	3	250,000	201,943	197,678	91,8	0,37	790,71	1249,54
14,5	1	250,000	151,866	194,914	90,5	0,362	779,66	1222,03
	2	250,000	151,866	193,400	89,8	0,359	773,60	1207,24
	3	250,000	151,866	205,093	90,4	0,362	820,37	1285,04

Teor de umidade do milho (decimal)	porosidade média do leite	massa específica aparente média (kg/m <sup>3</sup> )	massa específica aparente modelo Liu (kg/m <sup>3</sup> )	massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )
0,248	0,40	734,74	645,32624	1224,52
0,210	0,38	774,27	674,511	1247,49
0,170	0,37	792,02	720,239	1251,09
0,145	0,36	820,37	756,63525	1285,04

### D.2 Resultados experimentais para as propriedades físicas do milho – área específica

Dados experimentais (mm)				Oliveira et al. (2012, 2014)							área específica	
Amostra	comp	esp	largura	B (m)	C (m)	D (m)	b	E	área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	
1	12,61	4,42	10,12	0,0126	0,0044	0,0101	0,0067	0,8478	0,0003	2,95336E-07	944	
2	11,08	4,12	8,64	0,0111	0,0041	0,0086	0,0060	0,8426	0,0002	2,06514E-07	1070	
3	12,74	4,18	9,42	0,0127	0,0042	0,0094	0,0063	0,8703	0,0003	2,62661E-07	954	
4	12,06	3,54	8,52	0,0121	0,0035	0,0085	0,0055	0,8903	0,0002	1,90453E-07	1038	
5	11,30	5,00	9,08	0,0113	0,0050	0,0091	0,0067	0,8028	0,0003	2,68617E-07	1037	
6	10,22	4,18	9,00	0,0102	0,0042	0,0090	0,0061	0,7999	0,0002	2,01311E-07	1146	
7	10,84	4,22	7,60	0,0108	0,0042	0,0076	0,0057	0,8527	0,0002	1,82035E-07	1102	
8	12,44	4,62	9,02	0,0124	0,0046	0,0090	0,0065	0,8548	0,0003	2,71436E-07	962	
9	12,72	3,82	9,02	0,0127	0,0038	0,0090	0,0059	0,8872	0,0002	2,29486E-07	979	
10	12,02	4,86	9,76	0,0120	0,0049	0,0098	0,0069	0,8196	0,0003	2,98531E-07	977	
11	10,84	5,04	8,58	0,0108	0,0050	0,0086	0,0066	0,7950	0,0003	2,45444E-07	1081	
12	11,62	4,08	9,20	0,0116	0,0041	0,0092	0,0061	0,8497	0,0002	2,28377E-07	1025	
13	11,70	3,94	9,00	0,0117	0,0039	0,0090	0,0060	0,8608	0,0002	2,17232E-07	1028	
14	12,50	4,52	8,86	0,0125	0,0045	0,0089	0,0063	0,8624	0,0003	2,62108E-07	964	
15	12,38	4,00	8,06	0,0124	0,0040	0,0081	0,0057	0,8886	0,0002	2,08985E-07	1008	
16	11,18	4,10	8,68	0,0112	0,0041	0,0087	0,0060	0,8457	0,0002	2,08326E-07	1063	
17	13,32	4,98	9,22	0,0133	0,0050	0,0092	0,0068	0,8609	0,0003	3,20231E-07	903	
18	13,58	5,86	9,00	0,0136	0,0059	0,0090	0,0073	0,8450	0,0003	3,75006E-07	875	
19	10,92	4,30	8,60	0,0109	0,0043	0,0086	0,0061	0,8306	0,0002	2,11444E-07	1079	
20	13,42	4,30	7,62	0,0134	0,0043	0,0076	0,0057	0,9045	0,0002	2,30237E-07	961	
				Média	0,0120	0,0044	0,0089	0,0062	0,8506	0,0002	2,45688E-07	1010

Dados experimentais (mm)				Borges (2016)					área específica	
Amostra	comp	esp	largura	E (m)	G (m)	F (m)	área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	
1	12,61	4,42	10,12	0,0126	0,0044	0,0101	0,0005	5,6405E-07	809	
2	11,08	4,12	8,64	0,0111	0,0041	0,0086	0,0004	3,9441E-07	897	
3	12,74	4,18	9,42	0,0127	0,0042	0,0094	0,0004	5,0165E-07	848	
4	12,06	3,54	8,52	0,0121	0,0035	0,0085	0,0004	3,6374E-07	966	
5	11,30	5,00	9,08	0,0113	0,0050	0,0091	0,0004	5,1302E-07	797	
6	10,22	4,18	9,00	0,0102	0,0042	0,0090	0,0003	3,8448E-07	896	
7	10,84	4,22	7,60	0,0108	0,0042	0,0076	0,0003	3,4766E-07	922	
8	12,44	4,62	9,02	0,0124	0,0046	0,0090	0,0004	5,184E-07	815	
9	12,72	3,82	9,02	0,0127	0,0038	0,0090	0,0004	4,3829E-07	903	
10	12,02	4,86	9,76	0,0120	0,0049	0,0098	0,0004	5,7015E-07	783	
11	10,84	5,04	8,58	0,0108	0,0050	0,0086	0,0004	4,6876E-07	814	
12	11,62	4,08	9,20	0,0116	0,0041	0,0092	0,0004	4,3617E-07	880	
13	11,70	3,94	9,00	0,0117	0,0039	0,0090	0,0004	4,1488E-07	901	
14	12,50	4,52	8,86	0,0125	0,0045	0,0089	0,0004	5,0059E-07	828	
15	12,38	4,00	8,06	0,0124	0,0040	0,0081	0,0004	3,9913E-07	910	
16	11,18	4,10	8,68	0,0112	0,0041	0,0087	0,0004	3,9787E-07	897	
17	13,32	4,98	9,22	0,0133	0,0050	0,0092	0,0005	6,116E-07	769	
18	13,58	5,86	9,00	0,0136	0,0059	0,0090	0,0005	7,1621E-07	711	
19	10,92	4,30	8,60	0,0109	0,0043	0,0086	0,0004	4,0382E-07	881	
20	13,42	4,30	7,62	0,0134	0,0043	0,0076	0,0004	4,3972E-07	877	
				Média	0,0120	0,0044	0,0089	0,0004	4,69230E-07	855

### D.3 Resultados experimentais e simulados para o teor de umidade médio do leito

Tempo de secagem (min)	Teor de umidade médio do leito de grãos de milho (M, - %bs)																	
	$v = 2,0 \text{ m.s}^{-1}$									$v = 4,0 \text{ m.s}^{-1}$								
	Teste 10 - 40°C			Teste 11 - 50°C			Teste 12 - 60°C			Teste 14 - 50°C			Teste 13 - 40°C			Teste 15 - 60°C		
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)
0	22,15	22,15	0,02	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01
10	21,46	20,81	3,02	20,85	19,89	4,60	19,93	19,26	3,37	19,93	19,12	4,06	19,64	19,12	2,65	19,13	18,24	4,67
20	20,95	20,23	3,45	20,01	19,16	4,22	19,34	18,41	4,78	19,16	18,34	4,28	19,14	18,59	2,85	18,32	17,46	4,68
30	20,62	19,77	4,08	19,49	18,74	3,87	18,82	17,91	4,85	18,49	17,83	3,59	18,71	18,23	2,59	17,55	16,69	4,93
40	20,28	19,40	4,31	19,05	18,29	3,98	18,27	17,38	4,92	17,97	17,33	3,61	18,34	17,88	2,51	16,90	16,07	4,86
50	19,97	19,08	4,45	18,61	17,83	4,18	17,59	16,84	4,22	17,49	16,85	3,65	17,99	17,55	2,46	16,34	15,60	4,57
60	19,68	18,79	4,52	18,20	17,37	4,57	17,27	16,47	4,61	17,02	16,53	2,90	17,70	17,30	2,28	15,79	15,06	4,65
70	19,39	18,52	4,49	17,81	17,04	4,35	16,98	16,14	4,94	16,61	16,21	2,43	17,41	17,06	1,97	15,34	14,62	4,71
80	19,13	18,27	4,51	17,45	16,83	3,55	16,52	15,83	4,13	16,23	15,89	2,10	17,14	16,85	1,71	14,95	14,27	4,51
90	18,87	18,05	4,37	17,11	16,51	3,52	16,16	15,49	4,14	15,89	15,59	1,91	16,87	16,64	1,37	14,45	14,06	2,68
100	18,64	17,84	4,28	16,80	16,25	3,27	15,77	15,23	3,45	15,56	15,36	1,29	16,63	16,46	1,05	14,18	13,86	2,27
110	18,41	17,65	4,14	16,52	16,05	2,82	15,43	15,02	2,67	15,25	15,17	0,52	16,42	16,29	0,80	13,87	13,67	1,41
120	18,20	17,46	4,07	16,23	15,86	2,32	15,10	14,77	2,16	15,02	14,93	0,58	16,21	16,12	0,55	13,53	13,45	0,56
130	17,99	17,29	3,92	15,97	15,65	2,02	14,82	14,52	1,97	14,86	14,74	0,83	16,00	15,96	0,21	13,21	13,15	0,47
140	17,81	17,04	4,31	15,72	15,44	1,74	14,53	14,28	1,72	14,53	14,58	0,30	15,81	15,82	0,04	12,85	12,80	0,34
150	17,63	16,51	6,36	15,48	15,23	1,65	14,28	14,14	0,99	14,40	14,36	0,30	15,62	15,68	0,34	12,63	12,62	0,10
	Erro médio relativo - P (%)			Erro médio relativo - P (%)			Erro médio relativo - P (%)			Erro médio relativo - P (%)			Erro médio relativo - P (%)			Erro médio relativo - P (%)		
	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		

### D.4 Resultados experimentais para a razão de umidade do leito

Tempo de secagem (min)	Razão de umidade para o leito de grãos de milho					
	$v = 2,0 \text{ m.s}^{-1}$			$v = 4,0 \text{ m.s}^{-1}$		
	Teste 10 - 40°C	Teste 11 - 50°C	Teste 12 - 60°C	Teste 13 - 40°C	Teste 14 - 50°C	Teste 15 - 60°C
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,95	0,96	0,93	0,95	0,94	0,93
20	0,92	0,91	0,89	0,91	0,89	0,88
30	0,90	0,87	0,86	0,88	0,85	0,83
40	0,87	0,85	0,83	0,85	0,82	0,79
50	0,85	0,82	0,79	0,82	0,79	0,75
60	0,83	0,80	0,77	0,80	0,76	0,72
70	0,81	0,77	0,75	0,78	0,75	0,69
80	0,80	0,75	0,72	0,76	0,71	0,67
90	0,78	0,73	0,70	0,74	0,69	0,63
100	0,76	0,71	0,68	0,72	0,66	0,62
110	0,75	0,69	0,66	0,70	0,64	0,60
120	0,73	0,68	0,64	0,68	0,63	0,58
130	0,72	0,66	0,62	0,67	0,62	0,56
140	0,71	0,65	0,61	0,65	0,60	0,53
150	0,70	0,63	0,59	0,64	0,59	0,52

## D.5 Resultados experimentais e simulados para o teor de umidade dos copos

Tempo de secagem (min)	Umidade do copo 01 (% bs)																		
	Teste 10			Teste 11			Teste 12			Teste 14			Teste 13			Teste 15			
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	
0	22,15	22,15	0,02	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01	
15	20,57	20,45	0,60	20,00	19,50	2,50	18,90	18,81	0,45	18,81	18,70	0,59	19,10	18,84	1,35	17,81	17,63	1,01	
35	19,77	19,54	1,17	18,94	18,32	3,25	17,49	17,72	1,34	17,98	17,69	1,61	18,29	18,09	1,08	16,46	16,42	0,27	
55	18,98	18,80	0,95	18,16	17,54	3,37	16,73	16,67	0,35	16,74	16,67	0,41	17,60	17,40	1,11	15,73	15,30	2,74	
75	18,19	18,24	0,31	16,98	16,99	0,06	15,59	15,80	1,37	15,91	16,07	1,00	16,68	16,96	1,73	14,90	14,51	2,59	
95	17,79	17,72	0,39	16,59	16,38	1,22	14,83	15,56	4,96	15,50	15,56	0,43	16,27	16,55	1,73	13,96	13,73	1,65	
115	17,39	17,38	0,06	15,80	15,98	1,10	14,07	14,88	5,79	15,20	15,08	0,81	15,98	16,21	1,41	13,23	13,46	1,67	
135	17,00	16,97	0,17	15,80	15,40	2,54	13,69	14,38	5,07	14,67	14,64	0,18	15,58	15,89	1,97	12,82	13,03	1,66	
150	16,60	16,74	0,82	15,02	15,28	1,76	13,31	14,13	6,19	14,26	14,28	0,18	15,58	15,68	0,65	12,51	12,72	1,69	
Erro médio relativo - P (%)		0,50			1,76			2,84			0,58			1,23			1,48		
Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		1,00			0,98			0,99			1,00			0,99			0,99		

Tempo de secagem (min)	Umidade do copo 02 (% bs)																		
	Teste 10			Teste 11			Teste 12			Teste 14			Teste 13			Teste 15			
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	
0	22,15	22,15	0,02	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01	
15	20,51	20,46	0,24	20,08	19,51	2,84	18,96	18,84	0,65	18,94	18,77	0,90	18,67	18,86	1,01	17,72	17,63	0,52	
35	19,69	19,52	0,86	18,59	18,45	0,78	17,59	17,53	0,31	17,53	17,43	0,62	17,85	18,03	1,06	16,59	16,35	1,48	
55	18,98	18,81	0,93	17,85	17,57	1,57	16,21	16,67	2,83	16,37	16,75	2,31	17,43	17,48	0,23	15,35	15,29	0,42	
75	18,04	18,25	1,14	17,22	17,00	1,32	15,29	15,94	4,25	15,99	15,99	0,06	17,14	16,94	1,20	14,52	14,72	1,33	
95	17,63	17,79	0,92	16,36	16,31	0,30	14,83	15,37	3,62	15,21	15,56	2,28	16,73	16,59	0,85	13,70	13,74	0,35	
115	17,22	17,33	0,67	16,11	15,87	1,49	14,37	14,83	3,15	14,82	15,02	1,30	16,32	16,17	0,91	13,28	13,59	2,29	
135	17,34	16,99	2,01	15,74	15,64	0,62	13,45	14,45	7,40	14,82	14,72	0,69	15,91	15,90	0,10	12,98	12,98	0,01	
150	16,93	16,73	1,14	15,37	15,18	1,19	13,00	14,10	8,53	14,44	14,27	1,18	15,38	15,67	1,89	12,46	12,79	2,64	
Erro médio relativo - P (%)		0,88			1,12			3,42			1,04			0,81			1,00		
Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		0,99			0,99			0,99			0,99			0,99			1,00		

Tempo de secagem (min)	Umidade do copo 03 (% bs)																		
	Teste 10			Teste 11			Teste 12			Teste 14			Teste 13			Teste 15			
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	
0	22,15	22,15	0,00	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01	
15	20,44	20,45	0,06	19,67	19,49	0,88	18,64	18,79	0,77	18,92	18,73	1,00	19,10	18,84	1,37	17,81	17,66	0,86	
35	19,55	19,56	0,03	18,53	18,44	0,49	17,47	17,71	1,35	17,75	17,65	0,59	18,30	18,06	1,31	16,61	16,35	1,61	
55	18,78	18,83	0,26	17,89	17,57	1,78	16,21	16,66	2,81	16,58	16,68	0,63	17,49	17,47	0,14	15,42	15,34	0,51	
75	18,25	18,31	0,36	17,13	16,93	1,14	15,36	15,86	3,26	16,18	16,08	0,64	17,09	16,93	0,92	14,73	14,46	1,85	
95	17,79	17,75	0,18	16,63	16,42	1,28	14,52	15,49	6,68	15,40	15,37	0,23	16,29	16,51	1,40	13,94	14,26	2,29	
115	17,34	17,37	0,18	15,87	15,93	0,42	13,67	14,82	8,36	15,13	15,04	0,58	16,40	16,21	1,19	13,65	13,43	1,63	
135	16,99	16,99	0,03	15,61	15,37	1,50	13,25	14,36	8,33	14,62	14,61	0,08	16,00	15,88	0,74	13,14	12,97	1,27	
150	16,73	16,76	0,13	15,23	15,30	0,44	12,83	14,15	10,26	14,35	14,38	0,25	15,60	15,67	0,46	12,34	12,56	1,75	
Erro médio relativo - P (%)		0,14			0,88			4,65			0,44			0,84			1,31		
Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		1,00			1,00			1,00			1,00			0,99			0,99		

Tempo de secagem (min)	Umidade do copo 04 (% bs)																		
	Teste 10			Teste 11			Teste 12			Teste 14			Teste 13			Teste 15			
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	
0	22,15	22,15	0,02	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01	
15	20,68	20,44	1,16	20,04	19,52	2,61	19,30	18,81	2,50	19,15	18,69	2,42	19,12	18,86	1,39	17,89	17,66	1,28	
35	19,96	19,62	1,69	18,89	18,46	2,26	17,79	17,52	1,52	17,94	17,73	1,13	18,32	18,06	1,41	16,67	16,32	2,12	
55	19,59	18,79	4,08	18,13	17,58	3,01	16,65	16,65	0,01	16,72	16,62	0,59	17,53	17,44	0,50	15,86	15,33	3,30	
75	18,13	18,28	0,85	17,36	17,00	2,10	15,90	15,93	0,19	15,91	16,02	0,68	17,12	16,95	1,02	14,62	14,32	2,06	
95	17,76	17,84	0,42	16,60	16,29	1,87	15,51	15,44	0,44	15,50	15,48	0,16	16,72	16,56	0,99	14,21	14,14	0,49	
115	17,40	17,34	0,29	16,22	16,00	1,32	14,75	15,03	1,90	15,20	15,07	0,85	16,33	16,19	0,82	13,39	13,18	1,56	
135	17,03	17,08	0,26	15,83	15,52	1,96	14,37	14,36	0,10	14,69	14,73	0,30	15,93	15,92	0,04	13,00	13,14	1,09	
150	17,03	16,80	1,39	15,07	15,24	1,13	13,62	14,17	4,02	14,28	14,49	1,42	15,53	15,65	0,81	12,57	13,19	4,90	
Erro médio relativo - P (%)		1,13			1,81			1,19			0,84			0,78			1,87		
Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		0,97			0,99			0,99			0,99			0,99			0,98		

Tempo de secagem (min)	Umidade do copo 05 (% bs)																					
	Teste 10			Teste 11			Teste 12			Teste 14			Teste 13			Teste 15						
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)				
0	22,15	22,15	0,02	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01				
15	20,90	20,44	2,21	20,31	19,53	3,85	19,54	18,74	4,08	19,21	18,72	2,55	18,99	18,83	0,84	18,17	17,63	2,97				
35	19,78	19,50	1,43	19,56	18,27	6,61	18,12	17,78	1,87	17,66	17,49	0,92	18,31	18,06	1,38	16,54	16,47	0,41				
55	19,04	18,79	1,31	18,43	17,54	4,84	16,48	16,67	1,13	16,88	16,76	0,72	17,51	17,38	0,78	15,32	15,26	0,39				
75	19,04	18,21	4,35	17,68	17,07	3,43	16,21	16,03	1,12	16,11	16,05	0,36	17,23	16,98	1,49	15,03	14,64	2,60				
95	17,92	17,77	0,83	16,93	16,26	3,95	15,06	15,25	1,26	15,72	15,35	2,35	16,71	16,54	1,01	14,10	13,94	1,16				
115	17,92	17,36	3,15	16,17	15,93	1,53	14,68	14,78	0,70	14,95	15,04	0,61	16,43	16,19	1,46	13,81	14,00	1,36				
135	17,55	16,96	3,34	15,80	15,51	1,85	14,40	14,33	0,51	14,56	14,79	1,62	16,03	15,89	0,92	13,00	12,76	1,79				
150	17,55	16,74	4,60	15,05	15,24	1,30	14,02	14,16	0,98	14,56	14,31	1,72	15,63	15,67	0,25	12,59	12,71	0,98				
Erro médio relativo - P (%)			2,36	Erro médio relativo - P (%)			3,04	Erro médio relativo - P (%)			1,30	Erro médio relativo - P (%)			1,21	Erro médio relativo - P (%)			0,90	Erro médio relativo - P (%)		1,30
Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,98	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,96	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,99	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,99	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			1,00	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		0,99

Tempo de secagem (min)	Umidade do copo 06 (% bs)																					
	Teste 10			Teste 11			Teste 12			Teste 14			Teste 13			Teste 15						
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)				
0	22,15	22,15	0,02	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01				
15	20,89	20,44	2,11	20,27	19,53	3,66	19,46	18,84	3,21	18,74	18,71	0,13	19,03	18,84	1,00	18,98	17,65	7,00				
35	19,75	19,48	1,33	19,09	18,54	2,87	18,26	17,65	3,33	17,63	17,62	0,05	18,37	18,04	1,82	17,77	16,18	8,95				
55	18,99	18,79	1,04	18,03	17,61	2,30	17,06	16,67	2,28	16,82	16,74	0,47	17,21	17,50	1,65	16,55	16,30	7,59				
75	18,61	18,21	2,14	17,63	16,96	3,84	15,85	15,90	0,31	16,13	16,10	0,18	17,21	16,92	1,72	15,34	14,45	5,78				
95	17,98	17,76	1,23	16,85	16,29	3,27	15,56	15,43	0,82	15,31	15,60	1,85	16,83	16,58	1,45	14,53	14,00	3,61				
115	17,47	17,37	0,59	16,06	15,98	0,50	14,65	14,81	1,08	14,91	15,04	0,90	16,44	16,14	1,80	13,72	13,49	1,61				
135	17,09	17,01	0,51	15,55	15,43	0,77	14,25	14,34	0,66	14,50	14,69	1,27	16,05	15,85	1,25	13,31	13,00	2,35				
150	16,71	16,77	0,36	15,16	15,28	0,82	13,95	14,15	1,38	14,50	14,27	1,59	15,67	15,68	0,11	12,91	12,63	2,13				
Erro médio relativo - P (%)			1,04	Erro médio relativo - P (%)			2,01	Erro médio relativo - P (%)			1,45	Erro médio relativo - P (%)			0,72	Erro médio relativo - P (%)			1,20	Erro médio relativo - P (%)		4,34
Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,99	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,98	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,99	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			1,00	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,98	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		0,95

Tempo de secagem (min)	Umidade do copo 07 (% bs)																					
	Teste 10			Teste 11			Teste 12			Teste 14			Teste 13			Teste 15						
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)				
0	22,15	22,15	0,02	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01				
15	21,28	20,45	3,87	21,06	19,54	7,21	20,20	18,80	6,94	19,58	18,77	4,16	18,99	18,85	0,75	18,98	17,66	6,96				
35	20,91	19,50	6,73	19,93	18,52	7,06	19,32	17,78	7,99	18,42	17,45	5,25	18,20	18,04	0,85	17,77	16,32	6,06				
55	20,55	18,81	8,47	19,18	17,61	8,17	18,00	16,64	7,55	17,64	16,87	4,36	17,80	17,33	2,65	15,75	15,36	2,51				
75	19,82	18,25	7,90	18,42	16,82	8,71	17,12	16,11	5,93	16,86	15,92	5,58	17,40	16,99	2,32	14,95	14,71	1,62				
95	19,45	17,89	8,03	17,29	16,51	4,52	16,25	15,21	6,36	16,08	15,53	3,44	16,60	16,61	0,05	14,54	14,28	1,78				
115	19,08	17,28	9,47	16,92	15,86	6,26	15,37	14,98	2,53	15,31	15,07	1,57	16,20	16,14	0,41	13,33	13,49	1,22				
135	18,35	17,01	7,31	16,67	15,47	7,24	14,93	14,27	4,42	14,53	14,64	0,79	15,81	15,90	0,58	13,33	12,98	2,64				
150	18,35	16,70	8,99	16,16	15,25	5,67	14,49	14,18	2,15	14,53	14,36	1,14	15,53	15,66	0,85	12,93	12,47	3,54				
Erro médio relativo - P (%)			6,76	Erro médio relativo - P (%)			6,09	Erro médio relativo - P (%)			4,88	Erro médio relativo - P (%)			2,92	Erro médio relativo - P (%)			0,94	Erro médio relativo - P (%)		2,93
Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,95	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,94	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,95	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,97	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,98	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		0,97

Tempo de secagem (min)	Umidade do copo 08 (% bs)																					
	Teste 10			Teste 11			Teste 12			Teste 14			Teste 13			Teste 15						
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)				
0	22,15	22,15	0,02	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01				
15	20,81	20,45	1,74	20,15	19,51	3,17	20,67	18,81	9,00	19,92	18,76	5,83	19,33	18,88	2,36	18,06	17,64	2,34				
35	20,41	19,44	4,74	19,33	18,45	4,56	19,07	17,66	7,38	18,25	17,45	4,36	18,48	18,00	2,60	16,77	15,93	5,01				
55	20,01	18,81	6,00	18,91	17,60	6,96	18,27	16,68	8,67	16,99	16,83	0,98	18,06	17,47	3,24	15,48	15,22	1,73				
75	19,60	18,21	7,11	17,67	16,97	3,98	17,07	15,82	7,33	16,57	16,05	3,18	17,21	16,95	1,53	14,63	14,81	1,27				
95	18,40	17,79	3,30	17,26	16,30	5,55	15,87	15,51	2,27	16,16	15,65	3,12	17,21	16,52	4,02	14,20	13,51	4,80				
115	18,40	17,35	5,72	16,43	15,89	3,30	15,47	14,87	3,85	14,90	15,00	6,55	16,78	16,21	3,44	13,87	13,46	2,95				
135	17,60	16,99	3,46	15,66	15,51	0,99	15,07	14,69	2,53	14,90	14,74	1,11	15,93	15,86	0,43	13,01	13,09	0,63				
150	17,19	16,72	2,75	15,46	15,24	1,44	14,27	13,96	2,18	14,07	14,25	1,34	15,51	15,68	1,13	12,58	12,49	0,68				
Erro médio relativo - P (%)			3,87	Erro médio relativo - P (%)			3,33	Erro médio relativo - P (%)			4,80	Erro médio relativo - P (%)			2,29	Erro médio relativo - P (%)			2,08	Erro médio relativo - P (%)		2,16
Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,94	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,96	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,93	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,97	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,96	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		0,98

Tempo de secagem (min)	Umidade do copo 09 (% bs)																					
	Teste 10			Teste 11			Teste 12			Teste 14			Teste 13			Teste 15						
	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)	Experimental	Simulação	Erro (%)				
0	22,15	22,15	0,02	21,57	21,57	0,01	21,18	21,18	0,02	20,88	20,88	0,00	20,31	20,31	0,00	20,31	20,31	0,01				
15	21,25	20,43	3,87	20,57	19,49	5,23	20,66	18,76	9,17	19,58	18,68	4,61	19,01	18,89	0,58	18,55	17,63	4,95				
35	20,10	19,55	2,75	19,72	18,56	5,90	19,46	18,02	7,40	18,80	17,57	6,57	18,61	17,97	3,48	16,89	16,37	3,07				
55	19,72	18,79	4,72	19,30	17,61	8,75	18,66	16,67	10,68	18,03	16,73	7,20	17,44	17,52	0,45	15,64	15,33	1,97				
75	19,34	18,24	5,67	18,03	16,94	6,00	17,87	16,09	9,93	16,86	16,02	4,98	17,17	16,93	1,44	14,81	14,84	0,18				
95	18,95	17,76	6,28	17,60	16,32	7,29	17,07	15,16	11,16	16,47	15,30	7,14	16,78	16,51	1,61	13,98	14,07	0,64				
115	18,57	17,38	6,42	17,18	15,96	7,07	16,27	14,93	8,22	15,70	15,07	3,96	16,39	16,23	0,98	13,15	13,15	0,06				
135	18,57	17,01	8,42	16,33	15,85	2,97	15,87	14,30	9,92	15,70	14,79	5,76	16,13	15,87	1,57	13,26	13,15	0,83				
150	17,80	16,75	5,94	15,91	15,11	5,01	15,47	14,18	8,35	14,92	14,32	3,98	15,61	15,69	0,51	12,84	12,75	0,72				
Erro médio relativo - P (%)			4,90	Erro médio relativo - P (%)			5,36	Erro médio relativo - P (%)			8,32	Erro médio relativo - P (%)			4,91	Erro médio relativo - P (%)			1,18	Erro médio relativo - P (%)		1,38
Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,98	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,94	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,94	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,97	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>			0,98	Coef. Determ. - R <sup>2</sup>		0,99

## APÊNDICE E – Equações para os modelos de camada espessa

### E.1 Modelo Hukill

A variação espacial unidimensional da temperatura do ar de secagem é dada por

$$G_{ar} c_{p,ar} \frac{\partial T_{ar}}{\partial x} = \rho_{gr\tilde{a}o} h_{lv} \frac{\partial M_s}{\partial t} \quad (\text{E.1})$$

onde  $G_{ar}$ ,  $c_{p,ar}$  e  $T_{ar}$  são o fluxo mássico, calor específico e temperatura do ar de secagem, respectivamente,  $\rho_{gr\tilde{a}o}$  é a massa específica média do grão e  $h_{lv}$  o calor latente de vaporização da água.

A condição inicial e de contorno são dadas como

$$M_s(x, 0) = M_{s,0} \quad \text{e} \quad \frac{(T_{ar} - T_e)}{(T_0 - T_e)} = e^{-cx}, \quad \text{para } t = 0 \quad (\text{E.2})$$

$$T_{ar}(0, t) = T_0 \quad \text{e} \quad MR = e^{-kt}, \quad \text{para } x = 0 \quad (\text{E.3})$$

A solução proposta por Hukill fornece uma equação na forma

$$MR = \frac{2^x}{2^x + 2^\tau - 1} \quad (\text{E.4})$$

onde  $x$  e  $\tau$  são variáveis de espaço e tempo, respectivamente.

Baughman *et al.* (1971 apud BORTOLAIA, 2011) apresentou uma solução para a razão de secagem na forma

$$MR = \frac{1}{x} \ln \ln \frac{e^x + e^\tau - 1}{e^\tau} \quad (\text{E.5})$$

Wang *et al.* (2004) usando um modelo exponencial proposto onde a solução do mesmo permite calcular a razão de umidade e a temperatura do grão no espaço e tempo, este foi apresentado na forma

$$MR(x, \tau) = \frac{e^x}{e^x + e^\tau - 1} \quad (\text{E.6})$$

$$T_{gr\tilde{a}o}(x, \tau) = \frac{e^\tau}{e^x + e^\tau - 1} \quad (\text{E.7})$$

## E.2 Modelo de Thompson

A seguir são descritas algumas importantes equações deste modelo (THOMPSON, 1968; SILVA, 2008).

Considerando a troca de calor sensível entre o ar de secagem e os grãos as temperaturas podem ser relacionadas como

$$0,24 T_0 + W_0 (588 + 0,45 T_0) + c_{p,gr\tilde{a}o} R_m (1 + M_s) T_{gr\tilde{a}o} = 0,24 T_{e,ar} + W_0 (588 + 0,45 T_{e,ar}) + c_{p,gr\tilde{a}o} R_m (1 + M_s) T_{e,ar} \quad (\text{E.8})$$

onde  $T_{e,ar}$  é a temperatura do ar em equilíbrio com o grão,  $R_m$  é a razão entre a massa inicial de matéria seca e a massa inicial de ar seco,  $W_0$  é a umidade absoluta do ar inicial e  $c_{p,gr\tilde{a}o}$  é o calor específico do grão, estes dois últimos são dados como

$$RH = \frac{P_{atm} W_0}{(0,622 + W_0) P_{sat}} \quad (\text{E.9})$$

$$c_{p,gr\tilde{a}o} = 0,35 + \left( \frac{0,851 M_s}{1 + M_s} \right) \quad (\text{E.10})$$

onde  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica,  $P_{sat}$  é a pressão de saturação do ar de secagem. A pressão de saturação do ar de secagem (mmHg) pode ser dada segundo Brooker *et al.* (1992) na forma

$$P_{sat} = 51,715 e^{\frac{51,594 - 6834}{(T_{e,ar} + 273,16) - 5,169 \ln(T_{e,ar} + 273,16)}} \quad (\text{E.11})$$

A umidade de equilíbrio foi determinada por Thompson utilizando a EQ. (E.12), os valores dos parâmetros foram determinados para o milho testado ficando na forma

$$M_e = 1,206 \left[ \frac{-\ln(1 - 0,01 RH)}{T_{e,ar} + 45,6} \right]^{0,5} \quad (E.12)$$

A razão de umidade dos grãos é determinada como uma função do tempo de secagem, para tanto é usada a EQ. (E.13) para camada delgada, que após a determinação experimental dos coeficientes pode ser usada para explicitar o tempo de secagem, ficando na forma

$$t = a \ln \ln MR + b (\ln \ln MR)^2 \quad (E.13)$$

$$a = -1,706 + 0,0088 T_{e,ar} \quad e \quad b = 148,7 e^{-0,059 T_{e,ar}} \quad (E.14)$$

As temperaturas do ar de secagem e dos grãos são consideradas iguais e após um intervalo de tempo característico pode ser calculada pela equação na forma

$$\begin{aligned} 0,24 T_{e,ar} + W_0 (588 + 0,45 T_{e,ar}) + c_{p,gr\tilde{a}o} R_m (1 + M_s) T_{e,ar} + \\ (W - W_0) T_{e,ar} = 0,24 T_{ar} + W (588 + 0,45 T_{ar}) + \\ c_{p,gr\tilde{a}o} R_m (1 + M_s) T_{ar} + (W - W_0) h_{fg} \end{aligned} \quad (E.15)$$

onde  $h_{fg}$  é o calor latente de vaporização da água livre, sendo uma função da temperatura de equilíbrio e do teor de umidade do grão, dado na forma

$$h_{fg} = (606 - 0,57 T_e) (1 + 4,35 e^{-28,28 M_s}) \quad (E.16)$$

### F.1 Modelo de *Michigan State University*(MSU)

A seguir são descritos os balanços de massa e energia para obtenção das equações diferenciais parciais do modelo MSU (BROOKER *et al.*, 1992; SOUZA, 1996, SOUZA, 2013).

➤ Balço de energia para o ar de secagem

O balanço de energia para o ar pode ser dado pela equação de conservação da energia no volume de controle na forma

$$\begin{array}{ccccccc}
 \boxed{\text{Taxa de calor}} & & \boxed{\text{Taxa de calor}} & & \boxed{\text{Taxa de calor}} & & \boxed{\text{Taxa de calor}} \\
 \boxed{\text{transferido para}} & = & \boxed{\text{transferido pelo}} & - & \boxed{\text{transferido}} & - & \boxed{\text{transferido para}} \\
 \boxed{\text{o leito de grãos}} & & \boxed{\text{ar para dentro}} & & \boxed{\text{pelo ar para}} & & \boxed{\text{o fluido no}} \\
 \boxed{\text{por convecção}} & & \boxed{\text{do V.C.}} & & \boxed{\text{fora do V.C.}} & & \boxed{\text{interior do V.C.}} \\
 & & & & & & \text{(E.17)}
 \end{array}$$

A massa total de fluidos ( $m_{t,f}$ ) que entra no volume de controle (em  $y$ ) por unidade de tempo de secagem é dada por

$$\frac{dm_{t,f}}{dt} = (\rho_{ar} v_{ar} + \rho_{ar} v_{ar} W) A \quad \text{(E.18)}$$

onde  $\rho_{ar}$  e  $v_{ar}$  são a massa específica e velocidade do ar de secagem, respectivamente.

A taxa de energia que entra no volume de controle, pode ser dada pela EQ. (E.17) adicionando na mesma os calores específicos do ar ( $c_{p,ar}$ ) e do vapor de água ( $c_{p,vapor}$ ) e a temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), ficando na forma

$$\frac{dE_{entra}}{dt} = (\rho_{ar} v_{ar} c_{p,ar} + \rho_{ar} v_{ar} c_{p,vapor} W) A T_{ar} \quad \text{(E.19)}$$

A energia do fluido que sai (em  $y + dy$ ) do volume de controle é dada em função da variação espacial da temperatura do ar ao longo da espessura, ficando como

$$\frac{dE_{sai}}{dt} = (\rho_{ar} v_{ar} c_{p,ar} + \rho_{ar} v_{ar} c_{p,vapor} W) \left( T_{ar} + \frac{\partial T_{ar}}{\partial y} dy \right) A \quad \text{(E.20)}$$

A variação da energia do fluido que permanece no interior do volume de controle em relação ao tempo é dada como

$$\frac{dE_{interior}}{dt} = (\rho_{ar} c_{p,ar} + \rho_{ar} c_{p,vapor} W) \left( \frac{\partial T_{ar}}{\partial t} dy \varepsilon A \right) \quad \text{(E.21)}$$

onde  $\varepsilon$  é a porosidade do leito de grãos.

A taxa de calor transferido pelo ar por convecção pode ser calculada utilizando a lei de Newton do resfriamento expressa na forma

$$\frac{dE_{convecção}}{dt} = h a (T_{ar} - T_{grão}) A dy \quad (E.22)$$

onde  $a$  é a área interfacial de transferência de calor por volume.

Substituindo as EQ. (E.19), (E.20), (E.21) e (E.22) na EQ. (E.17) têm-se a equação de balanço de energia (temperatura) para o ar, na forma

$$\frac{\partial T_{ar}}{\partial t} = \frac{-h a (T_{ar} - T_{grão})}{\varepsilon \rho_{ar} (c_{p,ar} + c_{p,vapor} W)} - \frac{v_{ar}}{\varepsilon} \frac{\partial T_{ar}}{\partial y} \quad (E.23)$$

➤ Balanço de energia para os grãos a serem secos

O balanço de energia nos grãos ocorre segundo ao fornecimento de energia por convecção, o aquecimento da massa total dos grãos e a evaporação da água presente nos grãos, ficando na forma

$$\begin{array}{c} \text{Taxa de calor} \\ \text{transferido pela} \\ \text{convecção para} \\ \text{o leito de grãos} \end{array} = \begin{array}{c} \text{Taxa de calor para} \\ \text{aquecer os grãos e} \\ \text{a água presente} \\ \text{nos grãos} \end{array} - \begin{array}{c} \text{Taxa de calor para} \\ \text{evaporar a massa} \\ \text{de água presente} \\ \text{nos grãos} \end{array} - \begin{array}{c} \text{Taxa de calor para} \\ \text{aquecer o vapor} \\ \text{de água evaporado} \\ \text{dos grãos} \end{array} \quad (E.24)$$

Em um determinado instante  $t$  da secagem a energia dos grãos úmidos do leito no volume de controle ( $Ady$ ) é

$$E_{grão,t} = A dy (\rho_{grão} c_{p,grão} + \rho_{grão} c_{p,água} M_s) T_{grão} \quad (E.25)$$

onde  $\rho_{grão}$  e  $c_{p,grão}$  são a massa específica e o calor específico dos grãos, respectivamente.

No instante seguinte  $t + \Delta t$  da secagem a energia dos grãos no volume de controle ( $Ady$ ) é

$$E_{grão,t+\Delta t} = A dy (\rho_{grão} c_{p,grão} + \rho_{grão} c_{p,água} M_s) \left( T_{grão} + \frac{\partial T_{grão}}{\partial t} dt \right) \quad (E.26)$$

A taxa de energia líquida adquirida pelos grãos e a umidade no interior dos grãos durante a secagem pode ser expressa como

$$\frac{dE_{grão}}{dt} = A dy (\rho_{grão} c_{p,grão} + \rho_{grão} c_{p,água} M_s) \frac{\partial T_{grão}}{\partial t} \quad (E.27)$$

A taxa de umidade evaporada dos grãos é proporcional a variação espacial na umidade absoluta do ar de secagem que passa através de (Ady), sendo

$$\frac{dm_{\text{água}}}{dt} = \rho_{\text{ar}} v_{\text{ar}} \frac{\partial W}{\partial y} A dy \quad (\text{E.28})$$

A taxa de energia requerida para vaporização da umidade é dada como

$$\frac{dE_{\text{vaporização}}}{dt} = h_{lv} \frac{dM_s}{dt} = h_{lv} \rho_{\text{ar}} v_{\text{ar}} \frac{\partial W}{\partial y} A dy \quad (\text{E.29})$$

A taxa de energia para aquecer a o vapor de água evaporado dos grãos do volume de controle a uma temperatura  $T_{\text{grão}}$  para a temperatura do ar de secagem  $T_{\text{ar}}$  é

$$\frac{dE_{\text{aquecer,vapor}}}{dt} = c_{p,\text{vapor}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{grão}}) \rho_{\text{ar}} v_{\text{ar}} \frac{\partial W}{\partial y} A dy \quad (\text{E.30})$$

O balanço de energia para os grãos no volume de controle é dado pela substituição das EQ. (E.22), (E.27), (E.29) e (E.30) em (E.24), ficando na forma

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{\text{grão}}}{\partial t} = & \frac{h a (T_{\text{ar}} - T_{\text{grão}})}{\rho_{\text{grão}} (c_{p,\text{grão}} + c_{p,\text{água}} M_s)} \\ & + \frac{h_{lv} + c_{p,\text{vapor}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{grão}})}{(c_{p,\text{grão}} + c_{p,\text{água}} M_s)} \frac{\rho_{\text{ar}} v_{\text{ar}}}{\rho_{\text{grão}}} \frac{\partial W}{\partial y} \end{aligned} \quad (\text{E.31})$$

ou

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{\text{grão}}}{\partial t} = & \frac{h a (T_{\text{ar}} - T_{\text{grão}})}{\rho_{\text{grão}} (c_{p,\text{grão}} + c_{p,\text{água}} M_s)} \\ & + \frac{h_{lv} + c_{p,\text{vapor}} (T_{\text{ar}} - T_{\text{grão}})}{(c_{p,\text{grão}} + c_{p,\text{água}} M_s)} \frac{\partial M_s}{\partial t} \end{aligned} \quad (\text{E.32})$$

➤ Balço de massa para o ar de secagem

Para a realizaço do balço de massa para o ar devem ser analisadas a quantidade de água que entra e sai do volume de controle e as taxas de variaço da umidade no ar e nos grãos. A equaço pode ser dada da forma

$$\begin{array}{c} \text{Taxa de variaço} \\ \text{da massa de} \\ \text{umidade nos} \\ \text{grãos} \end{array} = \begin{array}{c} \text{Taxa mássica} \\ \text{da umidade} \\ \text{que entra no} \\ \text{V.C.} \end{array} - \begin{array}{c} \text{Taxa mássica} \\ \text{da umidade} \\ \text{que sai do} \\ \text{V.C.} \end{array} - \begin{array}{c} \text{Taxa de mudanço} \\ \text{na umidade do ar} \\ \text{no interior do} \\ \text{V.C.} \end{array} \quad (\text{E.33})$$

A variaço temporal da quantidade de umidade que entra no plano y no volume de controle é dado por

$$\frac{dm_{\text{água,entra,y}}}{dt} = G_{ar} A W \quad (\text{E.34})$$

onde  $G_{ar}$  é o fluxo mássico do ar, sendo  $G_{ar} = \rho_{ar} v_{ar}$ .

A variaço temporal da quantidade de umidade que deixa o plano y + dy no volume de controle é dado por

$$\frac{dm_{\text{água,sai,y+dy}}}{dt} = G_{ar} A \left( W + \frac{\partial W}{\partial y} dy \right) \quad (\text{E.35})$$

A taxa na mudanço da umidade do ar que permanece no interior do volume de controle é

$$\frac{dm_{\text{água,ar interior}}}{dt} = \varepsilon A dy \rho_{ar} \frac{\partial W}{\partial t} \quad (\text{E.36})$$

A taxa de variaço da massa de umidade presente nos grãos durante a secagem é dada como

$$\frac{dm_{\text{água,grão}}}{dt} = A dy \rho_{grão} \frac{\partial M_s}{\partial t} \quad (\text{E.37})$$

O balanço de massa para o ar de secagem no volume de controle é dado pela substituição das EQ. (E.34), (E.35), (E.36) e (E.37) em (E.33), ficando na forma

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{G_{ar}}{\epsilon \rho_{ar}} \frac{\partial W}{\partial y} = - \frac{\rho_{gr\tilde{a}o}}{\epsilon \rho_{ar}} \frac{\partial M_s}{\partial t} \quad (E.38)$$

ou

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{v_{ar}}{\epsilon} \frac{\partial W}{\partial y} = - \frac{\rho_{gr\tilde{a}o}}{\epsilon \rho_{ar}} \frac{\partial M_s}{\partial t} \quad (E.39)$$

Durante o desenvolvimento do modelo os autores propuseram desprezar o termo  $\frac{\partial W}{\partial t}$ , por ser muito pequeno em comparação os demais, assim a EQ. (E.39) é simplificada e pode ser expressa na forma

$$\frac{\partial W}{\partial y} = - \frac{\rho_{gr\tilde{a}o}}{v_{ar} \rho_{ar}} \frac{\partial M_s}{\partial t} \quad (E.40)$$

➤ Balanço de massa para os grãos

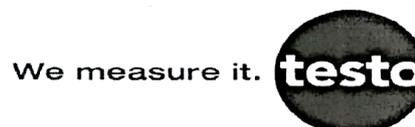
Para o balanço de massa para os grãos a serem secos são propostas equações de camada delgada, podendo as mesmas serem teóricas, empíricas ou semiempíricas, tal como descrito no item 2.2.3. Desta forma o modelo MSU é finalizado com a equação de variação do teor de umidade dos grãos na forma

$$\frac{\partial M_s}{\partial t} = \text{uma equação apropriada de camada delgada} \quad (E.41)$$

As EQ. (E.23), (E.32), (E.40) e (E.41) devem ser acopladas para a solução usando um método numérico adequado.

## ANEXO A - Certificados de calibração dos instrumentos

### A.1 Termo-anemômetro de fio quente



Página Page 2/2

Certificado de calibração Calibration certificate

54314/1

#### Equipamentos de medição Measuring equipment

Índice Index	Referência Reference	Rastreabilidade Traceability	Prox. Calibração Next cal.	Nº certificado Certificate n°
a	Padrão 06 S2	RBC	mai-17	SKV16050150
b	---	---	---	---

#### Condições ambientais Ambient conditions

Temperatura Temperature	18 ... 28°C	Pressão Pressure	930 ... 950 hPa
Umidade Humidity	45 ... 70%ur rF	Densidade do ar Air density	--- kg/m <sup>3</sup>

#### Procedimento de medição Measuring procedure

A calibração foi executada comparando a exibição do objeto a ser calibrado com os valores apresentados no instrumento de referência, PO 5.4-012 Rev 00. The calibration was executed by comparing the display of the object which was calibrated with the displayed values of the reference instrument, according PO 5.4-012 Ver 00.

#### Resultados das medições Measuring results

Valores sem aplicação dos fatores de correção. Values without application of correction factors.

Valor de referência Reference value	Valor medido Measured value	Erro de medição Measurement error	Incerteza de medição Measurement uncertainty		
			Valor Value	Fator de abrangência k Coverage factor k	V <sub>eff</sub>
m/s (a)	m/s	m/s	m/s		
2,93	2,79	-0,14	0,18	2,00	∞
4,94	4,85	-0,09	0,21	2,00	∞
10,08	9,46	-0,62	0,35	2,00	∞

Valores com aplicação dos fatores de correção. Values with application of correction factors.

Valor de referência Reference value	Valor medido Measured value	Erro de medição Measurement error	Incerteza de medição Measurement uncertainty		
			Valor Value	Fator de abrangência k Coverage factor k	V <sub>eff</sub>
m/s (a)	m/s	m/s	m/s		
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---

#### Observações especiais Special remarks

- 1 - Erro de medição = Valor medido - valor de referência.
- 2 - A incerteza de medição foi calculada de acordo com as recomendações do EA-4/02 com o fator de abrangência k (como descrito acima) e contém a incerteza do procedimento de medição e a incerteza do sistema de medição.
- 3 - Fatores de correção = Correção realizada no valor medido para compensar a pressão barométrica.

#### Testo do Brasil Instrumentos de Medição Ltda

Av Eng Artur Segurado, 615 - Jd Leonor - CEP: 13.041-070 - Campinas - SP - Brasil  
Fone: 19 3731-5816 - Fax: 19 3731-5819 - E-mail: calibracao@testo.com.br - www.testo.com.br

## A.2 Termo-higrômetro digital

5013/2018-1



**Contratante:** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

**Solicitante:** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

### 2. Descrição

Instrumento: Termohigrômetro Digital  
Marca: S/M  
Modelo: S/M

Identificação:  **17-1718**  
Série: S/N°

### 3. Método utilizado:

#### 3.1 Procedimentos

Conforme solicitação, nosso Laboratório realizou calibração no instrumento acima, com base em nosso procedimento de confirmação metrológica PGQ-005 e instrução de processo IPR-117 conforme última revisão.

#### 4. Padrão(ões) utilizado(s)

Descrição Padrão	Identificação	Certificado	Validade	Calibrado por
Calibrador Portátil Micro Processado	CAP.002	3631/17	05/2019	Ecil
Termohigrômetro Digital	THR.002	440/2018 - RBC	01/2021	Calibratec-MG
Termoresistência Tipo Pt-100 a 4 Fios	TPP.004	5018/18	05/2019	Ecil

#### 5. Incerteza das medições:

U = Incerteza das medições

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA 4/02.

#### 6. Condições ambientais:

Temperatura: 23 ± 5 °C

Umidade relativa: 52 ± 23 % u.r

#### 7. Resultados

TEMPERATURA "IN"						
Indicação Padrão	Indicação Instrumento	Tendência	K	U (±)	Erro Total	
( °C )	( °C )	( °C )		( °C )	( °C )	
15,0	14,6	-0,4	2,00	0,1	0,5	
25,0	24,9	-0,1	2,00	0,1	0,2	
30,2	30,4	0,2	2,00	0,1	0,3	
38,4	38,9	0,5	2,00	0,1	0,6	
45,5	46,3	0,8	2,00	0,1	0,9	

UMIDADE					
Indicação Padrão	Indicação Instrumento	Tendência	K	U (±)	Erro Total
( %UR )	( %UR )	( %UR )		( %UR )	( %UR )
30,8	32	1,2	2,00	3,5	4,7
45,5	47	1,5	2,00	3,5	5,0
60,0	63	3,0	2,00	3,5	6,5

TEMPERATURA "OUT"						
Indicação Padrão	Indicação Instrumento	Tendência	K	U (±)	Erro Total	
( °C )	( °C )	( °C )		( °C )	( °C )	
15,0	14,6	-0,4	2,00	0,1	0,5	
25,0	25,3	0,3	2,00	0,1	0,4	
30,2	30,7	0,5	2,00	0,1	0,6	
38,4	39,3	0,9	2,00	0,1	1,0	
45,5	46,7	1,2	2,00	0,1	1,3	

#### 8. Notas

CALIBRATEC Comércio e Calibrações de Instrumentos de Medição Ltda.  
Av.: Severino Ballesteros Rodrigues, 2999 - B. Ressaca - Contagem-MG - CEP 32110-005  
Telefax: (31) 3398-9022 - calibratec.mg@calibratec.com.br - www.calibratec.com.br



1/2

Só não medimos esforços!

5013/2018-1



## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 34290/2018

Os valores obtidos foram considerados após média de três medições

Nota: Instrumento calibrado com ajuste.

Erro Total = (|Tendência| + |U|)

U = Incerteza expandida de medição.

K = Fator de abrangência

Os resultados deste certificado são válidos exclusivamente para o instrumento calibrado descrito nas condições especificadas não sendo extensivo a quaisquer outros, mesmo que similares.

Não é permitida a reprodução parcial deste certificado.

Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica no caso do instrumento regulamentado.

Este certificado está em conformidade com a norma ABNT NBR - ISO/IEC-17025/2017.

A validade de calibração do instrumento deve ser estabelecida pelo usuário em plano de calibração descrito no seu sistema de qualidade.

Certificado digital, dispensa cópia física.

### 9. Observações

-

### 10. Considerações finais

Data de Calibração: 27/09/2018

Data de emissão: 27/09/2018

Data de recebimento: 14/09/2018

Lucas Viana de Oliveira

Lucas Viana de Oliveira  
Técnico Executante

FREDERICO CAMPOS  
Coord. Qualidade

Só não medimos esforços!



## A.3 Transdutor de pressão

5013/2018-2



**Contratante** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

**Solicitante:** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

### 2. Descrição

Instrumento: Transdutor de Pressão

Marca: HUBA CONTROL

Modelo: 694

Capacidade: 0 a 5 mbar

Identificação:  **N188252**

Série: 0351434

Valor de uma divisão: 0,01 mbar

### 3. Método utilizado:

#### 3.1 Procedimentos

Conforme solicitação, nosso Laboratório realizou calibração no instrumento acima, com base em nosso procedimento de confirmação metrológica PGQ-005 e instrução de processo IPR-090 conforme última revisão.

#### 4. Padrão(ões) utilizado(s)

Descrição Padrão	Identificação	Certificado	Validade	Calibrado por
Manômetro Digital	MO.009	LP - 164 840	12/2018	Escala
Multímetro 4 1/2 Dígitos	MUL.004	E0019/2018	01/2019	Labelo

#### 5. Incerteza das medições:

U = Incerteza das medição

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA 4/02.

#### 6. Condições ambientais:

Temperatura: 20 ± 2 °C

Umidade relativa: 50 ± 15 % u.r

#### 7. Resultados

SENTIDO CRESCENTE						
Indicação Instrumento	Indicação Padrão	Tendência	K	U (±)	Erro Total	
( mbar )	( mbar )	( mbar )		( mbar )	( mbar )	
1,00	0,98	0,02	2,00	0,07	0,09	
2,00	1,99	0,01	2,00	0,07	0,08	
3,00	3,03	-0,03	2,00	0,07	0,10	
4,00	4,00	0,00	2,00	0,07	0,07	
5,00	5,02	-0,02	2,00	0,07	0,09	

SENTIDO DECRESCENTE						
Indicação Instrumento	Indicação Padrão	Tendência	K	U (±)	Erro Total	
( mbar )	( mbar )	( mbar )		( mbar )	( mbar )	
1,00	0,99	0,01	2,00	0,07	0,08	
2,00	2,01	-0,01	2,00	0,07	0,08	
3,00	3,03	-0,03	2,00	0,07	0,10	
4,00	4,00	0,00	2,00	0,07	0,07	
5,00	5,02	-0,02	2,00	0,07	0,09	

#### 8. Notas

Os valores obtidos foram considerados após média de três medições

Nota: Instrumento calibrado com ajuste.

Erro Total = (|Tendência| + |U|)

U = Incerteza expandida de medição.

K = Fator de abrangência

Só não medimos esforços!

5013/2018-2



## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 32938/2018

Os resultados deste certificado são válidos exclusivamente para o instrumento calibrado descrito nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer outros, mesmo que similares.  
 Não é permitida a reprodução parcial deste certificado.  
 Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica no caso do instrumento regulamentado.  
 Este certificado está em conformidade com a norma ABNT NBR - ISO/ IEC-17025/2017.  
 A validade de calibração do instrumento deve ser estabelecida pelo usuário em plano de calibração descrito no seu sistema de qualidade.  
 Certificado digital, dispensa cópia física.

### 9. Observações

### 10. Considerações finais

Data de Calibração: 9/09/2018

Data de emissão: 19/09/2018

Data de recebimento: 14/09/2018

Luis Fernando de Almeida e Silva  
Técnico Executante

FREDERICO CAMPOS  
Coord. Qualidade

# CALIBRATEC®

Só não medimos esforços!