



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

ROSILDA SOUSA SANTOS

ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DE BLOCOS CERÂMICOS
ESTRUTURAIS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Campina Grande – PB

2019

ROSILDA SOUSA SANTOS

**ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DE BLOCOS CERÂMICOS
ESTRUTURAIS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Orientadores: **Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Linha de pesquisa: Simulação de Processos

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito final à obtenção do título de Doutor em Engenharia Processos.

Campina Grande – PB

2019

S237e Santos, Rosilda Sousa.
Estudo do processo de secagem de blocos cerâmicos estruturais: modelagem e simulação / Rosilda Sousa Santos. – Campina Grande, 2019.
216 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".

Referências.

1. Secagem em Estufa. 2. Tijolo Estrutural. 3. Transferência de Calor e Massa. 4. Modelo de Difusão Líquida. 5. CFD. I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. III. Título.

CDU 66.047(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MARIA ANTONIA DE SOUSA CRB 15/398

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **ROSILDA SOUSA SANTOS** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado aprovada em 25 de Abril de 2019.

Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
UAEQ /CCT/ UFCG
(Orientador)

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
UAEM /CCT/ UFCG
(Orientador)

Profa. Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias
UATEC /CDSA/ UFCG
(Examinador Externo)

Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes
UAEA_g /CTRN/ UFCG
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira
DESA /CCT/UEPB
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Boniek Evangelista Leite
PRODEP /CCT/UFCG
(Examinador Interno)

Campina Grande – PB

2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Nivaldo Pereira dos Santos (in memoriam) por estar sempre disposto a prestar apoio incondicional nos momentos mais difíceis de minha vida.

A meu esposo Dayvison Deocleciano Diniz, pelo amor, confiança, incentivo, conselhos e compreensão. Por acreditar que esse doutorado seria concretizado, me apoiando sempre e não me deixando desistir nunca.

A toda minha família de uma forma geral, pela disposição em prestar qualquer ajuda, unidos em fé com Deus o onipotente.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

À **Deus**, força maior que nos inspira e nos faz persistir diante dos obstáculos. Ao meu pai, **Nivaldo**, pelo amor, educação, e anos de dedicação, que Deus o tenha.

Ao meu orientador, professor **Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**, pela confiança, orientação, companheirismo, seriedade, paciência e toda a ajuda que me concedeu com os seus conhecimentos.

Ao meu orientador professor **Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**, pela orientação, paciência e toda a ajuda que me concedeu com os seus conhecimentos.

Aos professores e funcionários da Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Engenharia Mecânica da UFCG que contribuíram direta ou indiretamente com minha formação e para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos e companheiros de Doutorado, pessoas que me encorajaram a seguir com esse e outros projetos, em especial, Morgana de Vasconcellos Araújo e Diego David Silva Diniz.

Aos professores da Banca Examinadora que avaliaram o trabalho e cujas sugestões ajudaram a melhorar consideravelmente o nosso trabalho.

À Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA) por ter concedido e aprovado a realização dessa pós-graduação com afastamento integral dos meus trabalhos e manutenção da remuneração.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro concedido ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (CCT/UFCG).

A todos, meu muito obrigado.

ROSILDA, S. S., “Estudo do processo de secagem de blocos cerâmicos estruturais: modelagem e simulação”. 2019. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

RESUMO

Diversos estudos sobre a secagem de materiais cerâmicos vêm sendo desenvolvidos nos diversos setores da engenharia e fabricação. Tendo em vista que, este processo de secagem, porém, demanda grandes investimentos e alto consumo de energia, elevando os custos deste setor. Em muitas situações, é comum o uso de soluções teóricas como simulações numéricas que permitem, com relativa facilidade e baixo custo, alterar as condições operacionais e geométricas do secador ou objeto de secagem. Neste sentido, este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar o processo de secagem de tijolos cerâmicos estruturais compensadores industriais, considerando como um meio sólido, via Fluidodinâmica Computacional (CFD), nas seguintes condições experimentais: temperatura de secagem de 50 °C e 100°C, teor de umidade inicial de 0,1723191 e 0,169366 (kg/kg, b.s.) e umidade relativa do ar 18,39% e 2,34%, respectivamente. Foi realizado um estudo de malha utilizando o método do Índice de Convergência de Malha (ICM). Adotou-se um modelo matemático tridimensional transiente com base nas equações de conservação de massa, momento e energia, para descrever as trocas de calor e massa durante o processo de secagem. O fenômeno de secagem do tijolo estrutural foi estudado em duas situações: a primeira a secagem de tijolo compensador isoladamente considerando o modelo de secagem por difusão líquida. A segunda situação, onde o domínio de estudo considera o tijolo em uma estufa, neste caso realizando o acoplamento dos modelos de difusão líquida para o tijolo e de convecção forçada no lado da estufa. Foram analisados os resultados do campo de pressão, velocidade, temperatura e fração volumétrica da água no interior do tijolo obtido pelo pacote comercial Ansys CFX® 15.0. A comparação entre o teor de umidade e temperatura simulados com os dados experimentais permitiu validar os resultados numéricos e, assim, estimar os coeficientes de difusão de massa e transferência de calor na superfície do material. Os resultados das simulações indicam que há regiões com importantes gradientes de temperatura e umidade o que podem conduzir a ocorrência de trincas e deformações.

Palavras – chave: Secagem em estufa, tijolo estrutural, transferência de calor e massa, modelo difusão líquida, CFD.

ROSILDA, S. S., “Study of the drying process of structural ceramic blocks: modeling and simulation”. 2019. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

ABSTRACT

Several studies on the drying of ceramic materials have been developed in various engineering and manufacturing sectors. Considering that, this drying process, however, requires large investments and high energy consumption, raising the costs of this sector. In many situations, it is common to use theoretical solutions such as numerical simulations that allow, with relative ease and low cost, to change the operational and geometric conditions of the dryer or object of drying. In this sense, this work was carried out with the objective of studying the drying process of industrial ceramic structural bricks, considering as a solid medium, via Computational Fluid Dynamics (CFD), under the following experimental conditions: drying temperature of 50 °C and 100 °C , initial moisture content of 0,11723191 and 0,169366 (kg/kg, b.s) and relative humidity 18,39% and 2,34%, respectively. A mesh study was performed using the Grid Convergence Index (GCI) method. A transient three-dimensional mathematical model was adopted based on the conservation equations of mass, moment and energy, to describe the heat and mass changes during the drying process. The drying phenomenon of the structural brick was studied in two situations: the first the drying of compensating brick alone considering the model of drying by liquid diffusion. The second situation, where the domain of study considers the brick in a greenhouse, in this case making the coupling of the models of liquid diffusion to the brick and forced convection on the side of the greenhouse. The results of the field of pressure, velocity, temperature and volume fraction of the water inside the brick obtained by the commercial package Ansys CFX[®] 15.0 were analyzed. Comparison between the simulated moisture and temperature content with the experimental data allowed us to validate the numerical results and, thus, to estimate the mass diffusion and heat transfer coefficients on the surface of the material. The results of the simulations indicate that there are regions with important temperature and humidity gradients which can lead to cracks and deformations.

Keywords: Greenhouse drying, structural brick, heat and mass transfer, liquid diffusion model, CFD.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELA	xvii
LISTA DE QUADRO	xviii
NOMENCLATURA	xix
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	22
1.1 Objetivo geral	25
1.2 Objetivos específicos.....	25
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 Fundamentação Teórica.....	26
2.1.1 Cerâmica	26
2.1.1.1 Histórico	26
2.1.1.2 Especificações da indústria de cerâmica vermelha.....	28
2.1.2 Argila.....	29
2.1.3 Tijolos	31
2.1.3.1 Tipologia e propriedades	31
2.1.3.1.1 Tijolos maciços cerâmicos.....	31
2.1.3.1.2 Blocos cerâmicos	33
2.1.3.2 Processo de fabricação dos blocos cerâmicos (Tijolos).	35
2.1.3.2.1 Tratamento térmico: secagem e queima	36
2.1.4 Secagem.....	42
2.1.4.1 Teoria e modelos de secagem.....	42
2.1.4.2 Secagem de produtos cerâmicos	45
2.1.4.2.1 Fundamentos	45
2.1.4.2.2 Estado da arte acerca da secagem de produtos cerâmicos	47
2.2 Análise estatística de dados	51
2.2.1 Medidas de dispersão	51
2.2.2 Distribuição t de Student	53

2.3	Fluidodinâmica computacional (CFX)	56
2.4	Índice de Convergência de Malha e Estimativas de Erros de Discretização	58
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....		60
3.1	Definição do problema físico	60
3.2	Domínio de estudo.....	61
3.2.1	As geometrias.....	61
3.2.1.1	O tijolo estrutural.....	61
3.2.1.2	O sistema tijolo/estufa	63
3.2.2	Malha numérica	63
3.3	Modelagem matemática.....	64
3.3.1	Equações governantes	64
3.3.1.1	Secagem de tijolo compensador	67
3.3.1.2	Secagem de tijolo em estufa	67
3.4	Casos estudados.....	71
3.4.1	Casos experimentais.....	71
3.4.2	Parâmetros mássicos e térmicos do produto.....	72
3.4.3	Parâmetros do ar de secagem.....	73
3.5	Procedimento numérico.....	74
3.5.1	Estimativa dos coeficientes de transporte.....	75
3.6	Índice de Convergência de Malha (ICM)	78
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		81
4.1	Estudo da dependência de malha.....	81
4.1.1	O tijolo compensador	81
4.1.2	O tijolo compensador em estufa.....	93
4.2	Casos estudados.....	104
4.2.1	Secagem do tijolo compensador isoladamente.....	104
4.2.1.1	Cinética de secagem e aquecimento	104
4.2.1.2	Distribuição de temperatura e teor de umidade do tijolo.....	112
4.2.2	Secagem do tijolo compensador em estufa.....	118

4.2.2.1 Cinéticas de secagem e aquecimento	118
4.2.2.2 Análise térmica e mássica do tijolo e ar na estufa.....	125
4.2.3 Estudo comparativo entre os problemas físicos considerados	146
4.2.4 Influência da direção de fluxo no processo de secagem.....	151
4.2.5 Estimativa dos coeficientes de transporte (D, h_m e h_c).....	157
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS..	160
5.1 Conclusões.....	160
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	161
REFERÊNCIAS	162
APÊNDICE A – Discretização do Dominio.....	176
APÊNDICE B – Dados das Simulações Numéricas.....	178
Secagem do tijolo compensador isoladamente	178
Secagem do tijolo compensador em estufa.....	196
APÊNDICE C – Tijolos dimensionados	215

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Amostra de uma argila	29
Figura 2.2 Tijolo maciço.	32
Figura 2.3 Tijolo cerâmico vazado com 6 furos	33
Figura 2.4 Tijolo cerâmico estrutural	34
Figura 2.5 Disposição dos tijolos estruturais na construção de edificações	35
Figura 2.6 Forno contínuo tipo túnel.....	38
Figura 2.7 Modelo de um forno intermitente	39
Figura 2.8 Armazenagem do produto.	40
Figura 2.9 Fluxograma das transferências que ocorrem em um material sob ação de secagem.	45
Figura 3.1 Fotografia de um tijolo estrutural tipo compensador 07.	60
Figura 3.2 Geometria representativa do compensador 07.	61
Figura 3.3 Etapas da construção da geometria: a) criação de $\frac{1}{4}$ do tijolo, b) criação da superfície por extrusão e c) criação da peça por duplicação espelhada.....	62
Figura 3.4 Geometria representativa do compensador 07 no interior da estufa.....	63
Figura 3.5 Representação da malha numérica do compensador 07.....	65
Figura 3.6 Representação da malha numérica do domínio estufa/tijolo.....	66
Figura 3.7 Fluxograma da metodologia adotada nas simulações numéricas.....	80
Figura 4.1 Representação da malha computacional do tijolo (a) e detalhes das malhas M1 (b), M2 (c) e M3 (d).	82
Figura 4.2 Linhas de análise ao longo do tijolo compensador usado no estudo de refino de malha	83
Figura 4.3 Perfil de temperatura no tijolo ao longo das linhas a) L1, b) L2, c) L3 e d) L4; para diferentes malhas numéricas.....	84
Figura 4.4 Perfil do teor de umidade no tijolo, ao longo das linhas a) L1, b) L2, c) L3 e d) L4; para diferentes malhas numéricas.....	85
Figura 4.5 Temperatura média do tijolo para diferentes tamanhos de malhas e tempos de processo. a) t = 10 min, b) t = 20 min, c) t=30 min, d) t = 40 min, e) t = 50 min e f) t = 60 min.	86

Figura 4.6 Teor de umidade médio adimensional do tijolo em função do tempo para uma secagem a 80°C.	89
Figura 4.7 Teor de umidade médio do tijolo para diferentes tamanhos de malhas e tempos de processo. a) 10 min, b) 20 min, c) 30 min, d) 40 min, e) 50 min e f) 60 min.....	89
Figura 4.8 Teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem para as malhas M1, M2, M3 e extrapolada.....	91
Figura 4.9 Teor de umidade médio adimensional ao longo do tempo de processo para a malha M1 com ICM ₂₁ em forma de barras de erro (T = 80°C e UR = 5%).....	92
Figura 4.10 Teor de umidade médio adimensional ao longo do tempo de processo para a malha M2 com ICM ₃₂ em forma de barras de erro (T = 80°C e UR = 5%).....	92
Figura 4.11 Representação da malha computacional do tijolo em estufa (a) e detalhes das malhas M1 (b), M2 (c) e M3 (d).....	94
Figura 4.12 Linhas de análise ao longo do tijolo em estufa, usados no estudo de refino de malha	95
Figura 4.13 Perfil da temperatura no tijolo em estufa ao longo das linhas a) L1, b) L2, c) L3 e d) L4, para diferentes malhas numéricas	95
Figura 4.14 Perfil do teor de umidade médio do tijolo em estufa, ao longo das linhas a) L1, b) L2, c) L3 e d) L4, para diferentes malhas numéricas	96
Figura 4.15 Temperatura média do tijolo em estufa para diferentes tamanhos de malhas e tempos de processo. a) 10 min, b) 20 min, c) 30 min, d) 40 min, e) 50 min e f) 60 min.	98
Figura 4.16 Teor de umidade médio do tijolo em estufa para diferentes tamanhos de malhas e tempos de processo. a) 10 min, b) 20 min, c) 30 min, d) 40 min, e) 50 min e f) 60 min.	101
Figura 4.17 Teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem para as malhas M1, M2, M3 e extrapolada (T = 80°C e UR = 5,0%)	102
Figura 4.18 Teor de umidade médio adimensional para a malha M1 com ICM ₂₁ em forma de barras de erro (T = 80°C e UR = 5,0%).....	103
Figura 4.19 Teor de umidade médio adimensional para a malha M2 com ICM ₃₂ em forma de barras de erro (T = 80°C e UR = 5,0%).....	103
Figura 4.20 Temperatura da superfície do tijolo em função do tempo de secagem (T = 80°C, UR = 5%). a) Adimensional e b) dimensional.....	105
Figura 4.21 Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo de secagem (T = 80°C, UR = 5%). a) Adimensional e b) dimensional	106

Figura 4.22 Intervalo da t Student com 95% de confiança para a temperatura do tijolo em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, UR 5%).	107
Figura 4.23 Intervalo da t Student com 95% de confiança para o teor de umidade do tijolo em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, UR = 5%)	108
Figura 4.24 Temperaturas do tijolo em função do tempo no tijolo para diferentes condições de secagem. a) $T = 50^{\circ}\text{C}$, 70°C e 90°C , e b) $T = 60^{\circ}\text{C}$, 80°C e 100°C	108
Figura 4.25 Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo para diferentes condições de secagem. a) $T = 50^{\circ}\text{C}$, 70°C e 90°C , e b) $T = 60^{\circ}\text{C}$, 80°C e 100°C	109
Figura 4.26 Comportamento transiente da temperatura do tijolo para diferentes condições de secagem	111
Figura 4.27 Comportamento transiente do teor de umidade médio adimensional do tijolo para diferentes condições de secagem	111
Figura 4.28 Representação dos planos XZ ao longo do domínio, usados para análise térmica e mássica do tijolo.	112
Figura 4.29 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de (a) 10 min e (b) 30 min.	113
Figura 4.30 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de (a) 60 min e (b) 15,5 horas.....	114
Figura 4.31 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de a) 10 min e b) 30 min.	116
Figura 4.32 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de a) 60 min e b) 15,5 horas	117
Figura 4.33 Temperatura da superfície do tijolo na estufa em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, UR = 5%). a) Adimensional e b) Dimensional	118
Figura 4.34 Teor de umidade médio do tijolo na estufa em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, UR = 5%). a) Adimensional e b) Dimensional	119
Figura 4.35 Intervalo da t Student com 95% de confiança para temperatura do tijolo em estufa em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, UR = 5%).	121
Figura 4.36 Intervalo da t Student com 95% de confiança para teor de umidade médio do tijolo em estufa em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, UR = 5%).....	121
Figura 4.37 Temperaturas do tijolo em função do tempo no tijolo para diferentes condições de secagem. a) $T = 50^{\circ}\text{C}$, 70°C e 90°C , e b) $T = 60^{\circ}\text{C}$, 80°C e 100°C	122

Figura 4.38 Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo para diferentes condições de secagem. a) $T = 50^{\circ}\text{C}$, 70°C e 90°C , e b) $T = 60^{\circ}\text{C}$, 80°C e 100°C	123
Figura 4.39 Comportamento transiente do teor de umidade médio adimensional do tijolo em estufa, para diferentes condições de secagem.....	124
Figura 4.40 Comportamento transiente da temperatura do tijolo em estufa, para diferentes condições de secagem.....	125
Figura 4.41 Representação dos planos XZ ao longo dos domínios, usados na análise termo-fluidodinâmica do sistema tijolo-ar de secagem.....	125
Figura 4.42 Distribuição de temperatura na superfície do tijolo nos temp de secagem de a) 10 min, b) 30 min, c) 60 min e d) 15,5 horas	126
Figura 4.43 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XZ, nos tempos de secagem de a) $t = 10$ min e b) 30 min ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).....	129
Figura 4.44 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XZ, nos tempos de secagem de a) $t = 60$ min e b) 15,5 horas ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$)	130
Figura 4.45 Distribuição de temperatura no ar e tijolo, em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de (a) 10 min e (b) 30 min ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).....	131
Figura 4.46 Distribuição de temperatura no ar e tijolo, em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de (a) 60 min e (b) 15,5 horas ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$)	132
Figura 4.47 Distribuição de umidade no ar e tijolo, no plano XZ ($Y = 0,1$ m), nos tempos de a) $t = 10$ min e b) $t = 30$ min ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$)	134
Figura 4.48 Distribuição de umidade no ar e tijolo, em diferentes planos XZ ($y = 0,1$ m), nos tempos de a) $t = 60$ min e b) $t = 15,5$ horas ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$)	135
Figura 4.49 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo, em diferentes planos XZ, nos instantes de a) $t = 10$ min e b) 30 min ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$)	136
Figura 4.50 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo, em diferentes planos XZ, nos instantes de a) $t = 60$ min e b) 15,5 horas ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$)	137
Figura 4.51 Campo vetorial da velocidade do ar em diferentes planos XZ nas posições (a) $Y = 0$ m, (b) $Y = 0,1$ m e (c) $Y = 0,2$ m ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$)	138
Figura 4.52 Campo de velocidade do ar em diferentes planos XZ nas posições (a) $Y = 0$ m, (b) $Y = 0,1$ m e (c) $Y = 0,2$ m m ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).....	140
Figura 4.53 Campos de pressão em diferentes planos XZ, nos instantes (a) $t = 10$ min e (b) $t = 30$ min ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$)	142

Figura 4.54 Campos de pressão em diferentes planos XZ, nos instantes (a) $t = 60$ min e (b) $t = 15,5$ horas ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).....	143
Figura 4.55 Distribuição do teor de umidade adimensional no plano xz em $y=0,1$ m, em $t = 60$ min, para as temperaturas do ar de secagem: (a) 50°C , (b) 60°C , (c) 70°C , (d) 80°C , (e) 90°C e (f) 100°C	145
Figura 4. 56 Distribuição de temperatura, no plano XZ ($Y = 0,1$ m), sobre tijolo isolado e tijolo na estufa, em diferentes tempos do processo ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).....	147
Figura 4.57 Distribuição do teor de umidade, no plano XZ ($Y = 0,1$ m), sobre tijolo isolado e tijolo na estufa, em diferentes tempos de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).....	148
Figura 4.58 Perfis de temperatura e teor de umidade adimensional no tijolo considerando isoladamente e na estufa ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).	150
Figura 4.59 Ilustração das direções do fluxo de ar na estufa – tijolo.	151
Figura 4.60 Comparação entre o resultado numérico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem.....	152
Figura 4.61 Comparação entre o resultado numérico e experimental da temperatura adimensional em função do tempo de secagem para as diferentes direções do fluxo de ar. ..	153
Figura 4.62 Influência da direção de fluxo na distribuição de temperatura, no plano XZ ($Y = 0,1$ m), sobre tijolo na estufa, em diferentes tempos do processo ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).....	155
Figura 4.63 Influência da direção de fluxo na distribuição do teor de umidade, no plano XZ ($Y = 0,1$ m), sobre tijolo na estufa, em diferentes tempos do processo ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$)	156
Figura 4.64 Teor de umidade médio adimensional em função do número de Fourier para diferentes tipos de tijolos ($T = 80^{\circ}\text{C}$).	159

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1 Parâmetros experimentais usados nas simulações numericas.....	72
Tabela 3.2 Dados usados nas simulações	75
Tabela 3.3 Propriedades termofísicas do ar e da argila usadas nas simulações.....	75
Tabela 3.4 Coeficiente de transferência de calor inicialmente determinado pela equação 3.30.	76
Tabela 3.6 Coeficiente de difusão de massa	77
Tabela 3.7 Dados utilizados no refino das malhas.....	80
Tabela 4.1 Dados quantitativos das malhas numéricas avaliadas.....	82
Tabela 4.2 Parâmetros da convergência de malha para a variável temperatura média.....	86
Tabela 4.3 Parâmetros de convergência de malha para a variável teor de umidade médio...	88
Tabela 4.4 Malha Numérica Avaliada	93
Tabela 4.5 Parâmetros da convergência de malha para a variável temperatura média.....	98
Tabela 4.6 Parâmetros de convergência de malha para a variável teor de umidade médio...	100
Tabela 4.7 Estudo de casos	107
Tabela 4.8 Coeficientes de transportes estimados para caso secagem de tijolo isoladamente.	157
Tabela 4.9 Coeficientes de transportes estimados para caso secagem de tijolo em estufa	158
Tabela 4.10 Dimensões da área, volume e relação área/volume	159

LISTA DE QUADRO

Quadro 2.1 Resistência mínima à compressão de um tijolo maciço.....	32
Quadro 2.2 Tipo de secagem e principais vantagens e desvantagens	37

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A_{estufa}	Área da estufa	[m ²]
A_s	Área superficial	[m ²]
D	Coefficiente difusão de massa	[m ² /s]
D_{ar}	Difusividade do vapor de água	[m ² /s]
D_h	Diâmetro hidráulico	[mm]
ERM_{QM}	Erro quadrático médio do teor de umidade	[(kg/kg) ²]
ERM_{QT}	Erro quadrático médio da temperatura	[(°C) ²]
ER	Erro relativo percentual	[%]
e_a	Erro relativo aproximado entre as malhas	[-]
$F_{o,m}$	Número de Fourier de transferência de massa	[-]
H	Entalpia do ar	[J/kg]
h_m	Coefficiente de transferência de massa	[m/s]
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² . K]
ICM	Índice de convergência de malha	[-]
IC	Intervalo de confiança	[-]
ka	Condutividade térmica do ar	[W/(m.K)]
k	Condutividade térmica	[W/(m.K)]
m_o	Massa inicial do produto	[kg]
$m(t)$	Massa do produto no tempo	[kg]
m_a	Massa de água do tijolo	[kg]
m_s	Massa do tijolo seco	[kg]
m	Massa de água	[kg]
m_{eq}	Massa de água na condição de equilíbrio	[kg]
M	Teor de umidade do produto em base seca	[kg/kg]
\bar{M}	Teor de umidade médio em base seca	[kg/kg]
\bar{M}	Teor de umidade médio adimensional	[-]
M_e	Teor de umidade de equilíbrio em base seca	[kg/kg]
M_o	Teor de umidade inicial em base seca	[kg/kg]
$\dot{m}_{ar\ seco}$	Vazão mássica do ar seco	[g/s]

\dot{m}_{vapor}	Vazão mássica do vapor de água	[g/s]
N	Número de elementos da malha	[-]
n	Número de pontos experimentais	[-]
\hat{n}	Número de parâmetros ajustados	[-]
P_{vap}	Pressão de vapor à temperatura T do ar de secagem	[Pa]
P_{vapor}^{sat}	Pressão de vapor de saturação	[Pa]
P	Pressão atmosférica	[Pa]
Pr	Número de Prandtl	[-]
p	Ordem aparente	[-]
Q_{conv}	Taxa de transferência de calor	[W]
Re	Número de Reynolds	[-]
r	Coefficiente de Pearson	[-]
R	Constante universal dos gases	[J/(kg°C)]
S^2_M	Variância do teor de umidade	[(kg/kg) ²]
S^2_T	Variância da temperatura	[(°C) ²]
S	Área superficial do sólido	[m ²]
T _o	Temperatura inicial do produto	[°C]
T*	Temperatura adimensional	[-]
T	Temperatura do ar de secagem	[°C]
t	Tempo de secagem	[s]
$t_{\frac{\alpha}{2}}$	Valor da área sob a distribuição t-student	[-]
T _s	Temperatura na superfície do tijolo	[°C]
T _e	Temperatura de equilíbrio do produto	[°C]
\vec{U}	Vetor velocidade	[m/s]
UR	Umidade relativa	[%]
V	Volume do tijolo	[m ³]
v_{arseco}	Velocidade do ar seco	[m/s]
v	Velocidade do ar de seacgem	[m/s]
W_{arseco}	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
y _i	Dados amostrais	[-]

Letras Gregas

α	Nível de significância	[%]
$\rho_{\text{ar seco}}$	Densidade do ar seco	[kg/m ³]
ρ	Densidade (massa específica)	[kg/m ³]
ϕ	Umidade relativa do ar	[%]
Φ	Variável qualquer	[-]
$\hat{\sigma}$	Desvio padrão	[-]
ω	Umidade absoluta	[kg/kg]
μ	Viscosidade do ar	[m ² /s]
γ	Tamanho representativo da malha	[-]
Δ	Variação	[-]
∇	Divergente	[-]

Sobrescritos

*	Adimensional
---	--------------

Subscrito

a	Ar
v	Vapor
0	Inicial
e	Equilíbrio
s	seco
m	massa
c	calor
conv	convecção
h	hidráulico

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O setor industrial da cerâmica apresenta grande variedade de produtos e processos produtivos em diferentes níveis de produção, qualidade dos produtos e grau de mecanização. O setor pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha ou estrutural, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, louças e porcelanas de mesa, isoladores elétricos de porcelana, cerâmica artística (utilitária e decorativa), filtros cerâmicos de água (uso doméstico), cerâmica técnica e isolantes térmicos (ANFACER, 2018).

O Brasil dispõe de importantes jazidas de minerais industriais de uso cerâmico, cuja produção está concentrada principalmente nas regiões sudeste e sul, onde estão localizados os maiores pólos cerâmicos do país. No entanto, as regiões norte e nordeste apresentam grande desenvolvimento, em razão da instalação de diversas fábricas e do significativo crescimento econômico, aumentando a demanda de materiais cerâmicos, principalmente dos segmentos ligados à construção civil (ANFACER, 2018).

A indústria de cerâmica vermelha é uma atividade econômica, que vem diversificando seu produto e aumentando cada vez mais seu mercado consumidor (SILVA et al., 2015). No Brasil, a indústria cerâmica tem participação de cerca de 1% no PIB Nacional, sendo aproximadamente 40% desta participação representada pelo setor de cerâmica vermelha, também conhecida por cerâmica estrutural. Este setor consome cerca de 70 milhões de toneladas de matérias primas por ano, através das 12 mil empresas distribuídas pelo país, a maioria de pequeno porte, gerando centenas de milhares de empregos (SANTOS Jr et al., 2017).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM) (2015), a evolução das indústrias cerâmicas brasileiras e, muitos produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingiram níveis de qualidade mundial, com apreciável quantidade exportada, devido a afluência de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais.

A cerâmica vermelha é obtida a partir da conformação de uma massa argilosa, submetida a um lento processo de secagem para a retirada de grande parte da água, seguido de calcinação em temperaturas elevadas. O processamento desses materiais tem sido um dos temas que mais tem atraído à atenção de pesquisadores e debatido em vários congressos e simpósios da área, sobretudo no que diz respeito à secagem deste tipo de material (MEDEIROS et al., 2016).

A secagem é de relevante importância pois sua adequada operação evita perdas materiais e energéticas durante o processo e pode agregar valor ao produto final. Neste sentido, gradientes de temperatura elevados e altas taxas de evaporação de água são fatores indesejáveis, tornando necessário o controle do processo (MARTINS et al., 2016).

A remoção de umidade na etapa de secagem deve ser realizada de maneira uniforme para evitar danos estruturais no estágio de queima, como trincas, deformação, entre outros que podem comprometer a qualidade das peças, e rápida, a fim de otimizar o processo de fabricação. Contudo, para entender esta secagem de maneira adequada, é necessário conhecer os processos físicos que ocorrem no estágio relacionado. Para compreender os fenômenos que ocorrem no processo de secagem da peça cerâmica, diversos autores vêm realizando estudos experimentais da remoção de umidade em produtos cerâmicos, a exemplo dos tipos de tijolos como cerâmicos e os compensadores industriais (NASCIMENTO et al., 2015).

Devido à complexidade e a importância do processo de secagem, modelos matemáticos podem ser estabelecidos a fim de analisá-lo. Esses modelos em geral são formulados levando-se em consideração informações, tais como: mecanismos de transporte de calor e massa, umidade dos sólidos, difusão, encolhimento ou retração volumétrica e as condições ambientais externas (ALMEIDA, 2009). Dependendo da espessura do material em estudo, os modelos são classificados em modelos de camada fina e camada espessa. Os modelos de camada fina, em geral, são mais limitados e as equações que os caracterizam são classificadas em empíricas, semi-empíricas ou teóricas. Estas equações, não levam em consideração os efeitos de variação de temperatura e umidade no interior do material durante o processo da secagem. Enquanto que os modelos de camada espessa, são mais completos que os de camada fina, possuindo equações mais complexas que levam em consideração as transferências de calor e massa entre o produto a ser seco e o ar que o circunda.

No processo de secagem, dependendo do material a ser secado, a umidade, geralmente água, pode se mover dentro dele por mecanismos diferentes, sendo a difusão um desses mecanismos. A água pode migrar dentro do material na forma de líquido e vapor. Apesar dessa definição, alguns pesquisadores (Silva et al., 2012), como simplificação da análise, admitem que a umidade migra através do material em fase líquida e que a vaporização ocorre apenas na superfície do sólido. Assim, pode-se usar o modelo de difusão líquida para descrever o processo de secagem, este modelo que é baseado na segunda Lei de Fick, descreve que a massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (GONELI et al., 2014).

Assim, visando um desenvolvimento tecnológico estudos de simulação numérica, capaz reproduzir os experimentos, tem sido validados. Estes estudos apresentam várias vantagens sobre os trabalhos experimentais realizados em laboratórios e plantas-piloto, tais como:

- a) Em vários instantes de tempo, é possível observar gradientes de umidade e temperatura no interior do sólido;
- b) Fluxos de calor e massa podem ser quantificados ao longo do tempo e espaço;
- c) A sensibilidade a pequenas mudanças dos parâmetros do processo é maior, eliminando as incertezas dos testes experimentais;
- d) A capacidade de modelagem preditiva permite o projeto e a otimização de secadores ou processos de secagem sem necessariamente ter que construir um protótipo, reduzindo custos;
- e) Não há limitação nas condições de secagem ou preocupações de segurança;
- f) Na simulação numérica, o estudo pode ser feito em escala real, sem a necessidade de redução de escala. A análise de resultados de pequena escala apresenta maior dificuldade;
- g) Não há necessidade de ter um espaço físico de laboratório maior para realizar os testes, levando a economias financeiras.

Nesse sentido, para se realizar simulações de alto nível, a técnica CFD é uma das ferramentas mais apropriada. Com ela, é possível aumentar o conhecimento sobre o fluxo de fluidos, bem como os campos de temperatura e umidade nos sistemas de secagem, como demonstrado por Khan e Straatman (2016).

O desenvolvimento de modelos eficientes e com alto grau de precisão, permite um controle otimizado do processo de secagem, possibilitando a redução de perdas no processo de fabricação das peças cerâmicas, redução de custos e obtenção de materiais mais imunes a trincas, rachaduras e fissuras.

Neste sentido, a motivação dessa pesquisa se dá em buscar meios de modelar matematicamente os fenômenos de transporte de calor e massa em sólidos durante a secagem. A proposta é desenvolver um modelo que possibilite representar o fenômeno de secagem de material cerâmico úmido, com particular referência a compensadores industriais, visando reduzir vários problemas, dentre eles a perda de energia, problemas ambientais; que insira os fenômenos físicos existentes no processo, que se aproxime cada vez mais da realidade que ocorre durante o processo de secagem e que seja rápido no tempo de resposta. O modelo

matemático deverá ser um modelo fenomenológico, que prioriza fatores e parâmetros físicos (a exemplo da quantidade de energia fornecida ao produto por convecção) que outros modelos, já existentes na literatura, não contém.

1.1 Objetivo geral

Estudar o processo de secagem de tijolos cerâmicos estruturais compensadores industriais via CFD.

1.2 Objetivos específicos

- a) Definir um modelo matemático tridimensional transiente capaz de representar os fenômenos de transferência de calor e massa durante o processo de secagem;
- b) Aplicar o Índice de Convergência de Malha (ICM) no estudo visando obter uma malha ótima;
- c) Analisar o processo de secagem do tijolo estrutural isoladamente e em estufa por meio de perfis e de campos de temperatura, teor de umidade, velocidade e pressão;
- d) Estudo da influência da temperatura e comportamento do ar de secagem, sobre o coeficiente de transferência de massa;
- e) Comparar resultados obtidos com os dados experimentais reportados na literatura para validar a modelagem matemática proposta;
- f) Estimar os coeficientes de transporte de calor e massa dos materiais cerâmicos submetidos a secagem.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho é composta por todo referencial teórico desde da matéria-prima, a argila, até o processo de fabricação do bloco cerâmico, tijolo estrutural, dando ênfase ao processo de secagem. Em seguida, é apresentada uma revisão do estado da arte, que tem por finalidade apresentar alguns relatos que foram reportados por diversos autores sobre a fabricação do tijolo e o processo de secagem do mesmo, os quais servirão como base para algumas justificativas que serão apresentados no presente trabalho. Também faz-se uma revisão sobre um estudo estatístico, no que se refere a medidas de dispersão, a distribuição t de Student, medida de correlação, intervalo de confiança e erro quadrático médio, os quais serão usados nessa pesquisa. Finaliza-se o capítulo com dois tópicos onde é apresentada algumas equações que foram utilizadas no desenvolvimento de cálculos usados na simulação numérica e o estudo sobre índice de convergência de malha.

2.1 Fundamentação Teórica

2.1.1 Cerâmica

2.1.1.1 Histórico

A história da cerâmica tem origem e acompanha a história do homem tornando-se objeto de documentação e identificação das sociedades antigas revelando a sua evolução, cultura, crenças e comportamentos (CERRA et al., 2011).

A cerâmica vermelha é obtida a partir da conformação de uma massa argilosa, submetida a um lento processo de secagem para a retirada de grande parte da água, seguido de calcinação em temperaturas elevadas (queima). O processamento desses materiais tem sido um dos temas que mais tem atraído à atenção de pesquisadores e debatido em vários congressos e simpósios da área, sobretudo no que diz respeito à secagem deste tipo de material (MEDEIROS et al., 2016).

A cerâmica pode ser utilizada em diversos tipos de atividades, que vai desde a atividade artística (em que são produzidos artefatos com valor estético) até em uma atividade industrial (em que são produzidos artefatos para uso na construção civil e na engenharia). Nos dias atuais, além de sua utilização como matéria-prima constituinte de diversos instrumentos domésticos, da construção civil e como material plástico nas mãos dos artistas, a cerâmica é também

utilizada na tecnologia de ponta, mais especificamente na fabricação de componentes de foguetes espaciais, devido à sua durabilidade (ANFACER, 2018).

A matéria prima assim como é considerada a argila, é utilizada como material de construção desde 4.000 a.c., mas não se tem indícios certos de quando se deu a origem do primeiro tijolo. Segundo a literatura, o homem teria passado a usar blocos secos ao sol quando as pedras naturais começaram a ficar escassas. Quando saiu de sua caverna e se tornou um agricultor, encontrou a necessidade de buscar abrigo, mas também notou que precisava de vasilhas para armazenar água, os alimentos colhidos e as sementes para a próxima safra. Tais vasilhas deveriam ser resistentes, impermeáveis e de fácil fabricação. Estas facilidades foram encontradas na argila, deixando pistas sobre civilizações e culturas que existiram milhares de anos antes da Era Cristã. Tem-se registros que o tijolo mais antigo foi encontrado nas escavações arqueológicas na cidade de Jericó, localizado no Oriente Médio, datado do período Neolítico (ANICER, 2002).

A origem da cerâmica no Brasil tem seus primórdios na Ilha de Marajó, sendo que a mesma aponta um avanço na cultura indígena que floresceu na ilha. Estudos revelam que há indícios de uma cerâmica mais simples, a qual deve ter sido criada na região amazônica por volta de 5.000 anos atrás. A cerâmica marajoara era altamente elaborada e de uma especialização artesanal que compreendia várias técnicas: raspagem, incisão, excisão e pintura. À vista disso, a tradição ceramista não chegou ao Brasil com os portugueses, nem veio junto com a bagagem cultural dos africanos. Os colonizadores, instalando as primeiras olarias, apenas estruturaram e concentraram mão-de-obra, modificando o processo nativo, muito rudimentar, com as tecnologias da época, a exemplo do uso do torno e das “rodadeiras”, conferindo simetria e acabamento mais refinado às peças (SEBRAE, 2008).

No momento atual, a cerâmica da construção civil vem se destacando e ocupa um lugar na economia brasileira. Foi percebido que não ocorreram mudanças tecnológicas relevantes ao longo de um período na produção desses blocos cerâmicos. Mas foi observado que a tecnologia em relação a fabricação desses blocos passou por um processo de desenvolvimento no que diz respeito a inovações. Isso deu-se nas últimas décadas. Mesmo assim, é natural que outros processos e inovações ainda ocorram (OLIVEIRA et al., 2005).

O Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de cerâmica argilosa do mundo, segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica o setor está presente em mais de 90% das obras brasileiras, e representa cerca de 4,8% da indústria da construção civil, gerando mais de 400 mil postos de trabalhos diretos e 1,25 milhão indiretos. Onde, conforme o Instituto

Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)/Governo federal o setor é constituído por 6.903 empresas, com faturamento anual superior a R\$18 bilhões (ANICER, 2014).

No Brasil, as regiões que mais se desenvolveram foram a Sudeste e a Sul, em razão da maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infraestrutura, melhor distribuição de renda, associado ainda as facilidades de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, são nelas onde se tem uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. Convém salientar que as outras regiões do país têm apresentado um certo grau de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, principalmente nos segmentos ligados a construção civil, o que tem levado a implantação de novas fábricas de cerâmicas nessa região (ABCERAM - Associação Brasileira de Cerâmica, 2015).

2.1.1.2 Especificações da indústria de cerâmica vermelha

O setor ceramista se destaca pela sua vasta diversidade de produtos, dentre os quais, pode-se citar: materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), cerâmica técnica e isolantes térmicos. No Brasil, podem ser encontrados todos estes segmentos citados, em maior ou menor grau de desenvolvimento e capacidade de produção. Ademais, podem ser encontrados fabricantes de matérias-primas sintéticas para cerâmica (a exemplo de alumina calcinada, alumina eletrofundida, carbetos de silício e entre outras). (ABCERAM - Associação Brasileira de Cerâmica, 2015).

No Brasil, a indústria de cerâmica vermelha confecciona os seguintes e principais produtos: tijolos maciços, blocos, telha, elementos vazados, tubos para saneamento (laje), lajotas, ladrilhos vermelhos, agregados leves e também argila expandida. Além de que, no Brasil, a maior parte da cerâmica vermelha é produzida por indústrias de pequeno e médio portes. Atendendo a construção civil em geral, as indústrias encontram-se distribuídas por todo o país e estão localizadas nas regiões onde há maior disponibilidade de matéria-prima e proximidade dos mercados consumidores. A maior produção está concentrada nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Mato Grosso e Paraná. Na realidade, a geração da renda por produção de cerâmica vermelha fica nos locais de produção, com alto significado social, na criação de empregos e ao propiciar a construção em geral, principalmente moradias (CNI (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS) - SENAI, 2008).

2.1.2 Argila

A Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM, (2015) define argila como um material natural, de textura terrosa, de granulação fina, constituída essencialmente de argilo-minerais, podendo conter outros minerais (quartzo, mica, pirita, hematita, etc.), matéria orgânica e outras impurezas.

Para Rocha et al. (2014), o termo argila (Figura 2.1) se emprega para fazer referência a um material terroso natural, o qual quando adicionado água adquire a propriedade de apresentar alta plasticidade. Segundo estes autores a argila é uma matéria-prima básica dos produtos cerâmicos, em que sua composição apresenta partículas coloidais cujo diâmetro é inferior a 2 μm , com alta plasticidade quando úmidos e que formam torrões de difícil desagregação quando sob pressão dos dedos.

Almeida (2009), diz que as argilas são compostas, segundo o ponto de vista químico e mineralógico, por silicatos hidratados de alumínio, outras também por ferro e magnésio geralmente cristalinos, os quais são denominados argilominerais, além de que pode conter outros minerais, matéria orgânica e sais solúveis.

Segundo Ribeiro et al. (2002), as argilas foram formadas na crosta terrestre pelo processo de desintegração de rochas ígneas sob a ação constante dos agentes atmosféricos, ou seja, das intempéries da natureza.

A argila é um insumo encontrado em grande abundância, sendo, na maioria das vezes, utilizado sem processamento na sua qualidade. Os produtos mais comuns, a partir da argila, são os tijolos de construção, telhas e tubulações de esgoto (CALLISTER JR., 2012).

Figura 2.1 Amostra de uma argila.



Fonte: Silva (2017).

Os materiais produzidos à base de argilas são de natureza heterogênea, geralmente constituídos de matérias-primas plásticas e não-plásticas. O estudo do comportamento de massas para sua utilização na indústria de produtos cerâmicos acabados requer conhecimentos aprofundados desde a seleção de matérias-primas até seu processamento final quando do tratamento térmico. No caso da utilização da massa cerâmica vermelha, sua base de formação é a argila que pode sofrer a adição em quantidades adequada de água, visando à obtenção de uma plasticidade indispensável ao processo de conformação (ISERHARD, 2009).

Dessa forma, a água torna-se um componente de fundamental importância no processo cerâmico. Sua adição à argila torna a massa cerâmica plástica, facilitando operações de processamento como moldagem, conformação e extrusão. A quantidade de água deve ser controlada, sendo de grande importância o conhecimento de seus princípios físicos e químicos quando em contato com o material cerâmico. A água adicionada na preparação da massa deve ser removida no processo de secagem. Caso contrário, poderão ocorrer fissuras e outros defeitos que serão vistos após o processo de queima.

Segundo o SEBRAE (2008), o setor de cerâmica vermelha utiliza como matéria-prima basicamente a argila comum; a massa resultante pode ser denominada simples ou natural, sendo composta por matéria orgânica, impureza e minerais de ferro, que adquirem maior resistência mecânica à temperaturas elevadas (entre 900 e 1.100°C).

As características que determinam sua conformidade e a maneira de uso na produção destes produtos são:

- a) granulometria (elevado teor de partícula com granulometria inferior a 2 μm);
- b) composição química e mineralógica (argilominerais e impurezas presentes);
- c) capacidade de troca de cátions, resultante de substituições isomórficas no retículo cristalino dos argilominerais;
- d) hidroplasticidade: adquire plasticidade ao se adicionar com a água.

As argilas apresentam diversas aplicações. Isso ocorre devido a sua plasticidade enquanto úmida e extrema dureza depois de cozida a mais de 900°C. A argila é amplamente empregada na cerâmica para produção de vários artefatos que vão desde os tijolos até semicondutores utilizados em computadores.

A argila teve uma de suas aplicações na medicina. Sua utilização terapêutica foi uma das primeiras formas da medicina natural conhecida pelo homem, tendo sido usada por séculos. As civilizações (egípcia, grega, indiana e chinesa) se beneficiaram-se das qualidades da argila quer para uso externo quer para uso interno. Sua estrutura molecular confirma um grande poder

de absorção, tendo a capacidade de extrair toxinas e substâncias nocivas do organismo produzindo efeitos ante-sépticos e anti-microbianos.

Além dessas, as aplicações abrangem outros campos tais como: indústrias do papel, do cimento, de refratários, da borracha, de aglomerantes de areia em moldes para fundição, dos plásticos e tintas plásticas, agricultura, agregados leves (classificados em três grupos): agregados leves naturais, agregados leves de sub-produtos industriais e agregados leves manufaturados.

2.1.3 Tijolos

2.1.3.1 Tipologia e propriedades

Nesta seção apresentar-se-á alguns dos diferentes tipos de tijolos cerâmicos fabricados e suas propriedades. Em destaque será dado ênfase ao tijolo cerâmico estrutural, objeto este de estudo para presente pesquisa.

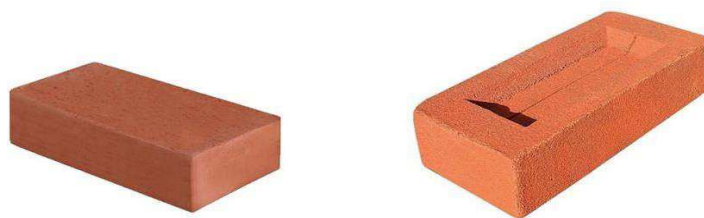
2.1.3.1.1 Tijolos maciços cerâmicos

São definidos como blocos produzidos a partir do barro comum, esse tipo de tijolo não possui espaços vazios. Dessa forma, proporciona um bom conforto térmico e acústico. São moldados com arestas retilíneas e considerados tijolos capazes de suportar elevadas temperaturas. Ele também é considerado um tijolo rústico, primitivo e produz alvenarias muito resistentes.

a) Tipologia

Na Figura 2.2 está ilustrado as imagens do tijolo maciço cerâmico. Observa-se que este produto tem todas as faces planas, podendo exibir rebaixos de fabricação em uma das faces de maior área. É comum os tijolos apresentarem expansão devido à incorporação de umidade do ambiente. Em consequência é recomendado que se evite a utilização de blocos ou tijolos cerâmicos com menos de duas ou três semanas após saírem do forno (LEGGERINI, 2010). Os tijolos maciços são encontrados em diversas cores, os mais comuns são: vermelho (natural), palha, mesclado e branco. Também existem diversos formatos, entres eles: bico-de-papagaio, cachimbo, canto 45°, canto arredondado, colonial, curvo, meia-lua, plaqueta e tramela.

Figura 2.2 Tijolo maciço.



Fonte: <https://www.guidugli.com.br/tijolo-a-vista-vermelho> (2018).

b) Propriedades mecânicas

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1983, 2005), os tijolos maciços cerâmicos são classificados, dependendo da resistência que atingirem, em categorias A, B e C (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 Resistência mínima à compressão de um tijolo maciço.

Categoria	Resistência à compressão (MPa)
A	1,5
B	2,5
C	4,0

Fonte: Transcrição da Tabela 2 da NBR 7170

Bildhauer et al. (2015) verificou em seu estudo que ao adicionar 30% de resíduo de mármore e granito à massa cerâmica, a mesma não atingiu a nenhum valor que se enquadra a uma das categorias descritas no Quadro 2.1. A absorção de água aumentou, conforme a elevação do percentual de resíduo adicionado à massa cerâmica. Isso se deve ao aumento da porosidade do produto final, à medida que se aumenta a adição de resíduo e, assim sendo, aumenta a possibilidade de retenção de água dentro do tijolo maciço.

Segundo Leggerini (2010), os tijolos e blocos cerâmicos possuem coeficiente de dilatação térmica pequeno, sendo adotado um valor médio de $6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$. Na construção civil, juntas de dilatação devem ser espaçadas de 12 a 15 mm, para evitar uma possível fissuração da alvenaria devido à expansão dos tijolos por incorporação de umidade, ou variação de temperatura.

2.1.3.1.2 Blocos cerâmicos

Os blocos cerâmicos são definidos como sendo um componente de alvenaria em forma de um prisma reto, que possui furos prismáticos ou cilíndricos perpendiculares às faces que os contém. Estes são confeccionados a partir da queima da cerâmica vermelha. A qualidade dos blocos cerâmicos está intimamente relacionada à qualidade das argilas empregadas na fabricação e também ao processo de fabricação (Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15270- 1:2005).

- **Blocos de vedação**

São blocos destinados à execução de paredes que suportam o peso próprio e pequenas cargas de ocupação (armários, pias, lavatórios, etc.). No assentamento dos blocos cerâmicos de vedação, os furos são geralmente dispostos horizontalmente, o que ocasiona a diminuição da resistência dos painéis de alvenaria. Paredes mais grossas aumentam a resistência do empreendimento, além de incrementar o conforto térmico e acústico (THOMAZ et al., 2009). A Figura 2.3 ilustra o tijolo de vedação tipo 6 furos.

Figura 2.3 Tijolo cerâmico vazado com 6 furos.



Fonte: <http://www.ceramicaorlandin.com.br/2014/produtos/tijolos-ceramicos>

- **Blocos estruturais**

A Figura 2.4 ilustra um tijolo cerâmico estrutural tipo compensador 07, objeto de estudo desta pesquisa. Este tipo de bloco é usado na construção de paredes estruturais e vem ganhando

destaque na construção civil, é responsável pela absorção dos esforços solicitantes do projeto e por isso é indispensável o uso de bloco estrutural com alto padrão de qualidade e grande resistência. Este tipo de bloco apresenta furos dispostos na direção vertical, o que possibilita a passagem de tubulações e instalações elétricas sem a necessidade de quebras posteriores.

Figura 2.4 Tijolo cerâmico estrutural.



Fonte: www.ceramicamifale.com.br/estrutural-slider-png/ (2018)

A Figura 2.5 ilustra a forma como deve ser disposto o tijolo cerâmico estrutural na construção de uma edificação. Uma vantagem do tijolo cerâmico estrutural é que ele é mais sustentável, considerando a emissão de CO₂ que ocorre ao longo de seu ciclo de vida. Outro benefício é que esse modelo de tijolo apresenta um menor coeficiente de condutibilidade térmica, além de excelente isolamento acústico. Isso sem contar que os tijolos cerâmicos são mais baratos que outros componentes (CERÂMICA e OLARIA ABCD, 2018).

Outra indicação que pode explicar a alta aceitação deste material no mercado de cerâmicos é o fato de, em lugares que possui inverno e verão rigorosos, com grande variação térmica num mesmo dia, as edificações construídas com este material são mais confortáveis, no sentido de proporcionar redução de custos de ar-condicionado, uma vez que a própria parede já ajuda na troca de calor. Outra está relacionada, por ser produzido com a matéria-prima argilosa, que é um produto leve, facilitando a atividade de mão de obra. Outras vantagens das edificações serem construídas com este material são: redução do consumo de formas de madeira, aço e concreto; maior rapidez na construção; custo reduzido em relação ao sistema convencional de vigas, pilares e lajes; facilidade no treinamento de mão de obra; maior organização no canteiro de obras.

Como desvantagens pode-se citar: arquitetura e design restringidos pelo tamanho e forma dos blocos estruturais; se a edificação foi construída com alvenaria estrutural e se deseja demolir uma parede, tornar-se necessário uma avaliação de um engenheiro. A estrutura pode cair se uma parede for retirada sem os devidos cuidados.

Figura 2.5 Disposição dos tijolos estruturais na construção de edificações.



Fonte: Neto, D. (2017)

2.1.3.2 Processo de fabricação dos blocos cerâmicos (Tijolos).

Na visão de Zandonadi e Jordão (2002), o processo fabricação do tijolo constitui-se de um encadeamento de operações cujas matérias-primas, as argilas, passam por uma seqüência de processamentos, adquirindo em cada etapa novas propriedades ou alterando suas características físicas e químicas até a obtenção do produto final. Thomaz (1990) relata que a fabricação de tijolos compõe várias fases, desde a exploração da jazida e tratamento prévio da matéria-prima, passando por moldagem, secagem e queima do produto.

De maneira geral, o processo de fabricação do tijolo ocorre a partir da captação da matéria-prima, a argila, que, após ser extraída, é transportada até a olaria para ser processada, onde ela é laminada e destorroada, com a finalidade de se diminuir a granulometria e reduzir futuras quebras. A esta massa pastosa é adicionada água e aditivos e laminada mais uma vez, visando fazer correções nas características químicas e mineralógicas da massa, eliminando componentes prejudiciais e melhorando o trabalho. Segundo o Mineropar (2007), a água e a energia são dois recursos bastante utilizados durante os processos de fabricação dos produtos cerâmicos, onde o primeiro está presente em quase todas as etapas e o segundo tem o uso centrado principalmente nos processos de secagem e queima. Todo este procedimento assegura

as exigências de plasticidade, para que a massa seja submetida à conformação – a moldagem propriamente dita – feita em máquinas extrusoras (AMBROZEWICZ, 2012).

Após o processo de extrusão, o qual é responsável por dar o formato desejado ao produto, os tijolos são cortados. O corte é realizado por meio de um sistema mecanizado, acoplado na saída da extrusora, segundo as dimensões desejadas, e postos para secar. Nesta etapa, dependendo das condições operacionais, podem surgir trincas, deformações e empenamentos que contribuem para reduzir a qualidade do produto pós-secagem. O transporte de umidade, do interior para superfície do material, pode ocorrer na forma líquida e/ou vapor, dependendo do tipo de produto e do percentual de umidade presente. Para finalizar, são cozidos a temperaturas que variam entre 750°C e 1.000°C durante 4 dias. Após a queima e resfriamento, os tijolos desenformados estão aptos para comercialização (STEIL, 2000).

2.1.3.2.1 Tratamento térmico: secagem e queima

O processamento térmico é de fundamental importância para obtenção dos produtos cerâmicos, pois dele dependem o desenvolvimento das propriedades finais destes produtos, como brilho, cor, porosidade, resistência à flexão a altas temperaturas, ao ataque de agente químico, entre outras. Esse tratamento compreende as etapas de secagem e queima das peças já preparadas e conformadas (PAULETTI, 2001).

A Associação Brasileira de Cerâmica - ABCERAM (2015) menciona que, mesmo depois do processo de conformação, nas peças cerâmicas ainda existem água. Sendo assim, para evitar futuros defeitos, faz-se necessário a eliminação desse líquido de maneira lenta e gradual, usando uma fonte térmica e ambientes ventilados, mantendo o controle das taxas de aquecimento, ventilação e umidade relativa do ar.

O processo de secagem pode ser realizado de duas formas: secagem natural ou secagem artificial. Na secagem natural, considerado um processo lento, os blocos são dispostos em prateleiras, em galpões cobertos, e secas pelo ar ambiente. Em algumas indústrias, essas prateleiras são próximas aos fornos, acelerando a secagem. Na etapa de secagem não existe um controle da temperatura, a total evaporação da água presente no material se dá quando esse apresenta uma coloração mais clara e uma melhor resistência. Já na secagem artificial, os tijolos são colocados em estufas, que geralmente absorvem ar quente dos fornos ou utilizam fonte própria de calor através de uma fornalha atingindo temperaturas em torno de 80°C. Aqui, há um controle sobre a secagem e existe uma maior homogeneidade das peças. O tempo de

permanência dos blocos nessas estufas é de um a dois dias (ABCERAM, 2015). O Quadro 2.2 resume as vantagens e desvantagens da secagem natural e artificial.

Quadro 2.2 Tipo de secagem e principais vantagens e desvantagens.

Tipo de secagem	Vantagens	Desvantagens
Natural	<ul style="list-style-type: none"> • Menos custo de geração de calor; • Favorece os locais em que as condições climáticas são mais favoráveis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo elevado de secagem; • Baixa produção; • Dependência do fator climático; • Pode-se afetar a qualidade das peças (trincas, deformações, de homogeneidade de secagem) caso o processo não seja bem controlado.
Artificial	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tempo de secagem; • Maior produtividade; • Redução de perdas; • Melhoria da qualidade das peças. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo com geração de calor; • Requer mais conhecimento técnico do operador; • Exige equipamentos e controles, como termômetros e higrômetros.

Fonte: Junior et al., (2013)

Segundo Tapia e Vilar (2000), no Brasil são utilizados três tipos de secadores artificiais: secadores estáticos, contínuos e semicontínuos. As principais características destes secadores são apresentadas a seguir:

- Secador estático:
 - a) Geralmente são de pequeno porte e os produtos a secar ficam imóveis;
 - b) Temperatura e fluxo do ar podem ser alterados;
 - c) Normalmente são utilizados por fabricantes de telhas, peças especiais e de grande porte;
 - d) Indicado para produtos com espessuras irregulares;
 - e) No início da secagem exige-se cuidados especiais e a velocidade de aquecimento é muito alta.

- Secador contínuo:
 - a) Requer cuidados no início da secagem e, como no estático, a velocidade de aquecimento é muito alta;
 - b) Geralmente trabalham com ventiladores móveis;
 - c) Possuem baixo custo operacional, utilizando-se de ar quente dos fornos.

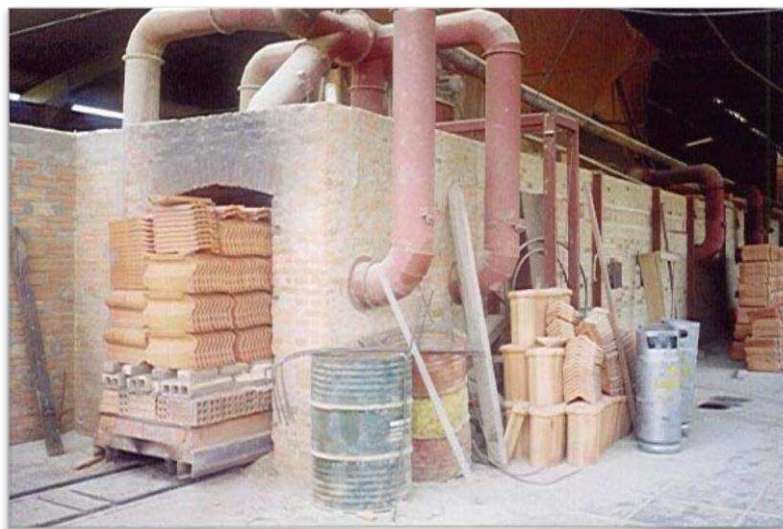
- Secador semicontínuo:
 - a) Produtos a secar são móveis;
 - b) Fluxo de ar é constante;
 - c) Indicado para operação conjugada com fornos contínuos.

Qualquer que seja o tipo do secador, o aquecimento pode ser feito usando fornalhas ou aproveitando a sobra de calor dos fornos (Figuras 2.6 e 2.7). Esta última opção resulta na maior eficiência no processo e gera redução nos custos.

A queima ou sinterização é a fase na qual o calor provoca transformações físico-químicas na massa argilosa. O tratamento térmico é realizado entre 800°C e 1700°C, em fornos do tipo contínuos (Figura 2.6) ou intermitentes (Figura 2.7), que operam em três fases:

- a) Aquecimento até a temperatura desejada;
- b) Permanência em um platô, durante certo tempo à temperatura especificada;
- c) Resfriamento até temperaturas inferiores a 200°C (NetCeramics, 2016).

Figura 2.6 Forno contínuo tipo túnel.



Fonte: Bastos (2003).

Figura 2.7 Modelo de um forno intermitente.



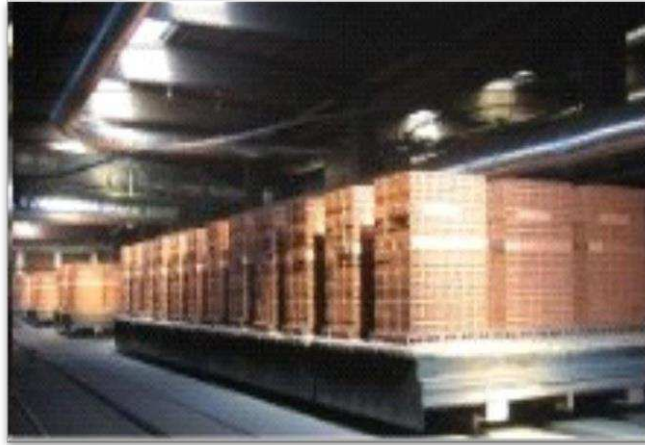
Fonte: Google, (2016).

No processo de queima, que pode variar de alguns minutos a vários dias, ocorre uma série de transformações: perda de massa (por perda de água), desenvolvimento de novas fases cristalinas e soldagem dos grãos. A resistência mecânica, a contração linear, a absorção e a porosidade são aspectos adquiridos não só pela boa uniformidade e controle da massa argilosa e perfeita secagem, mas, também, a partir da boa operação do forno (ANICER, 2008).

Após a retirada do forno, as peças são inspecionadas e remetidas ao consumo, rejeitando material quebrado, trincado, com lascas e, ainda, queimado em excesso. Alguns produtos cerâmicos, tais como louças sanitárias e de mesa, isoladores elétricos e materiais de revestimento, recebem camada fina e contínua de esmalte que, após a queima, adquire aspecto vítreo. Esta camada melhora os aspectos estéticos e higiênicos, bem como as propriedades mecânicas e elétricas (NETCERAMICS, 2016).

Uma das etapas finais do processo de fabricação do material cerâmico é o armazenamento, o qual é feito, geralmente, em área coberta, para serem comercializados em seguida (Figura 2.8).

Figura 2.8 Armazenagem do produto.



Fonte: Preceram, (2016).

Algumas empresas dão pouca importância para este setor da fábrica, alegando que a manutenção da integridade das peças não é de sua responsabilidade, durante o transporte da fábrica para o local de utilização. Isso faz com que muitas vezes o produto chegue ao consumidor final com muitas quebras, com as arestas lascadas ou trincados, dificultando sua utilização ou perdendo suas características estéticas.

Existem basicamente duas maneiras de se enviar o produto: a granel, onde as peças seguem para o cliente soltas no caminhão e seu carregamento e descarregamento se dá manualmente, e por meio de pallets, onde é embalada uma certa quantidade de unidades, que são colocadas em cima do caminhão através de carrinhos transportadores ou mini-guindastes.

Não há dúvidas que a segunda opção conserva melhor as características do produto, mas muitos fabricantes ainda não adotam este sistema, alegando os seguintes problemas:

- a) Alto custo da embalagem, onerando o preço do produto;
- b) Falta de equipamentos e alto custo de implantação;
- c) Falta de equipamentos adequados na descarga do produto ao cliente, ocorrendo uma despaletização;
- d) Custo superior ao método convencional.

Segundo Oliveira et al. (2005), podem ocorrer os seguintes defeitos em tijolos após seu processo de fabricação:

- a) Eflorescência

Sobre as superfícies externas dos tijolos formam-se depósitos de sais que apresentam cores e manchas indesejáveis. O tijolo queimado absorve umidade da água da chuva, da atmosfera e do terreno. A umidade absorvida pelo tijolo dissolve os sais, mas, se o ambiente externo se torna mais seco, ocorre o caminho inverso, evapora-se a água da superfície dando lugar a cristalização dos sais.

b) Coração negro

São manchas negras e cinzas que permanecem (se pode ver ao longo da secção transversal das peças no interior dos produtos) após processo de queima.

c) Empenamentos

São provocados por: secagem diferencial (se uma face da peça seca mais rapidamente que a outra formam-se gradientes de tensões residuais de contração, que podem deformar o produto); mal posicionamento no suporte de secagem (a colocação de peças verdes sobre suportes planos, para secagem, pode provocar empenamentos no material); boquilhas de feira (este tipo de empenamentos já se nota após a secagem).

d) Trincas

As trincas de secagem são pequenas fissuras causadas por secagem rápida. Geralmente inicia-se nas bordas e propagam-se até o centro da peça, sendo mais aberta na borda. As trincas de queima podem ser de aquecimento ou resfriamento. As trincas de aquecimento caracterizam-se por serem pouco sinuosas, abertas e de bordas dentadas, enquanto que as de resfriamento caracterizam-se por serem muito finas de bordas fechadas, normalmente em forma de S.

Muitos defeitos que se manifestam nas peças, na saída do secador, têm sua origem em etapas anteriores do processo produtivo e não têm nada que ver com a secagem. Assim, uma homogeneização incorreta da pasta origina retrações locais diferenciais (mais contração onde há mais umidade) que se traduzem em fissuras. Estas são bastante frequentes nos processos de fabricação manuais.

Outra causa frequente de microfissuras são as laminações produzidas nas boquilhas das extrusoras. Para reduzir este problema é aconselhável introduzir um redutor de plasticidade na pasta ou então modificar a geometria do molde para dar uma maior rugosidade. Um defeito associado é a presença de vazios. Se existe ar incorporado, a orientação preferencial resultante da extrusão funciona como um selante, podendo resultar no inchamento do material.

Outros fatores são devidos diretamente à fase de secagem, como a má colocação das peças no secador, ou seja, distribuição e disposição, ou a má aplicação dos vetores de secagem (elevação excessiva da temperatura e alta velocidade de ar).

Por último, vale a pena fazer uma referência ao problema da reabsorção de umidade. Dependendo do tipo de argila, se o tempo transcorrido desde que a argila deixa o secador até quando ela é introduzida no forno, é grande, e a umidade ambiente é muito alta, inicia-se um processo de re-hidratação (reabsorção) que pode provocar rupturas e/ou explosões, quando o material entra no forno (ELIAS, 1995).

Uma discussão detalhada dos defeitos em materiais cerâmicos oriundos do processo de secagem pode ser encontrada na literatura reportados por SILVA (2009), ALMEIDA (2009), SANCHEZ e BARBA (1998).

2.1.4 Secagem

2.1.4.1 Teoria e modelos de secagem

A secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução da umidade do sólido, mediante o fornecimento de energia ao mesmo. A umidade no meio poroso passa por processos de mudança de fase, migrando do interior ao exterior através de mecanismos que modificam seus parâmetros termofísicos, como o calor latente (de evaporação e de condensação da água), capacidade e condutividade térmicas específicas, que se encontram diretamente ligadas à porosidade. Tais fatores influenciam na velocidade de secagem que se torna característica de cada meio poroso considerado (ISERHARD, 2009).

Dependendo do tipo do produto e do percentual de umidade presente, o fenômeno de migração de umidade no interior do produto pode ser uma combinação de movimentos de umidade por difusão de líquido e de vapor, cada um predominando em certas etapas da secagem (STEFFE e SINGH, 1980). Outros autores afirmam que o processo se dá por difusão de líquido apenas, (BROOKER et al., 1992). Desta forma os seguintes mecanismos de umidade, têm sido propostos na literatura (FORTES e OKOS, 1980; BROOKER et al., 1992; STRUMILLO e KUDRA, 1986; CAMBUI, 2006):

- a) transporte por difusão líquida devido a gradientes de concentração de umidade;
- b) transporte por difusão de vapor devido a gradientes de concentração de umidade e pressão parcial do vapor (causado por gradientes de temperatura);

- c) transporte por efusão (escoamento Knudsen). Ocorre quando o caminho livre médio das moléculas de vapor for da mesma ordem de grandeza do diâmetro dos poros. É importante para condições de alto vácuo, como por exemplo, liofilização;
- d) transporte de vapor por termofusão devido a gradientes de temperatura;
- e) transporte de líquido por forças capilares devido a fenômenos de capilaridade;
- f) transporte de líquido por pressão osmótica devido a força osmótica;
- g) transporte de líquido devido a gravidade;
- h) transporte de líquido e de vapor, devido à diferença de pressão total, causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade;
- i) transporte por difusão superficial, devido a migração da mistura líquido mais vapor pelos poros da superfície do produto.

Neste contexto, apesar do não detalhamento de cada um destes mecanismos de transportes de umidade listados, informações adicionais podem ser encontradas nas referências anteriormente citadas.

O controle do processo de desumidificação e o conhecimento do mecanismo do movimento de umidade são fundamentais, uma vez que os resultados da simulação e/ou experimental, podem conduzir a condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (ALMEIDA et al., 2003).

Costa (2001) menciona que durante o processo de secagem de materiais cerâmicos, o ar, psicrometricamente controlado, ou seja, com temperatura e umidade controladas, circula sobre o meio poroso, fazendo com que esse ar ganhe ou perca umidade. Caso a pressão de vapor desse ar psicrométrico seja menor que a do meio poroso o qual está secando, esse meio poroso perderá umidade (maior pressão de vapor) até atingir uma condição de equilíbrio. Da mesma forma, se a pressão de vapor do ar psicrométrico for maior que a pressão parcial de vapor do meio poroso, esse meio poroso tenderá a absorver umidade até uma condição de equilíbrio. Essa condição de equilíbrio será atingida quando não mais houver trocas entre o ar psicrométrico e o meio poroso, ou seja, quando ambos estiverem na mesma pressão de vapor (equilíbrio de pressões), dando origem às chamadas curvas de equilíbrio entre a umidade do meio poroso e umidade relativa do ar, a uma certa temperatura.

O processo de secagem envolve complexos fenômenos de transferência de calor, massa, quantidade de movimento e variações dimensionais, exigindo a necessidade de se gerar modelos matemáticos que simule o processo com grande realismo físico.

Muitos trabalhos reportados na literatura relacionados à modelagem do processo de secagem (ARAÚJO et al., 2016; SILVA et al., 2011; ELIAS, 1995; HASATANI E ITAYA, 1992) relatam que o tema pode ser abordado de duas formas: uma baseia-se nos parâmetros externos ao sólido, a exemplo: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, correlacionando-as com a velocidade de secagem do sólido, enquanto a outra possui características como, as condições internas e os mecanismos de transporte no sólido.

O fato da diversidade e importância do processo de secagem, o estudo de modelos matemáticos com a finalidade de descrevê-los tem sido alvo de estudo de muitos pesquisadores. Para se modelar um processo de secagem é primordial o conhecimento das propriedades termodinâmicas do ar e suas mudanças no decorrer do processo. De acordo com a espessura do material em estudo, os modelos podem ser classificados em: modelos de camada fina ou camada espessa.

Vale ressaltar ainda que, existe modelo baseado na termodinâmica dos processos irreversíveis, o qual propõe que a água se move em meios capilares porosos, em condições isotérmicas, sob a ação de um gradiente de potencial de transferência de massa. Esta ação foi proposta por Luikov por analogia com a força motriz de transferência de calor, o gradiente de temperatura (LUIKOV, 1966). Ele ainda propôs a utilização de um modelo para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos baseado nos mecanismos de difusão, efusão, convecção de vapor e, difusão e convecção de água no interior do meio poroso. O processo é descrito por um sistema de equações diferenciais parciais acopladas para a temperatura, umidade e, em casos de intensas secagem, também a pressão. De maneira análoga, tem-se o modelo de Fortes e Okos (1980) que descreve o transporte de calor e umidade (líquido e vapor) simultâneos no interior do sólido, considerando que o fenômeno de encolhimento e efeitos de pressão total são desconsiderados, os autores assumiram:

- a) existência de equilíbrio local entre as fases sólidas, líquida e vapor;
- b) validade da equação de Gibbs para condições de não-equilíbrio;
- c) validade das leis fenomenológicas de Onsager;
- d) sólido contínuo e isotrópico;
- e) a água migra nas fases líquida e vapor;
- f) a taxa de transferência de calor e massa é mais lenta que a taxa de mudança de fase;
- g) validade do princípio de Curie.

Este princípio citado, não permite a interação e acoplamento de características sensoriais diferentes como, difusão e reação química. Maiores detalhes sobre este princípio podem ser encontrados em Luikov (1966).

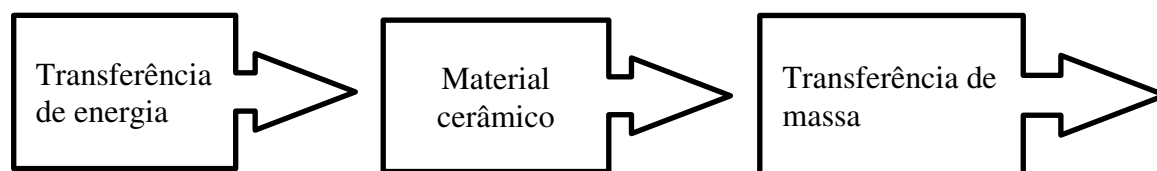
2.1.4.2 Secagem de produtos cerâmicos

2.1.4.2.1 Fundamentos

O processo de secagem tem alto consumo energético e o material precisa ser secado de forma uniforme para não apresentar falhas e tornar-se inutilizável pós-secagem. A secagem de produtos sólidos envolve os fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa, quantidade de movimento e variações dimensionais do produto, e tem como objetivo a remoção de uma grande parte da água presente no material poroso por meio de seu transporte e evaporação em um meio gasoso insaturado que envolve o material. Os processos de transferência de calor e massa ocorrem simultaneamente quando a transferência de energia (predominantemente sob a forma de calor) realiza-se do ambiente exterior para a superfície, com evaporação da umidade e a transferência de massa, sob a forma de vapor, ocorre do interior do sólido para a sua superfície como consequência da evaporação (MUJUMDAR, 2007). É, geralmente, uma etapa delicada e complexa no processo de fabricação de materiais cerâmicos, uma vez que é comum, nestes casos, ocorrerem defeitos que serão visíveis nas peças após a sua queima, etapa posterior do processo. A análise dos mecanismos envolvidos na secagem permite, então, evitar tais defeitos a partir do controle da taxa de secagem (OLIVEIRA et al., 2010).

A Figura 2.9 ilustra esquematicamente o processo de secagem de um material poroso úmido.

Figura 2.9 Fluxograma das transferências que ocorrem em um material sob ação de secagem.



Na prática, no período de secagem das peças cerâmicas, as condições climáticas do local como a temperatura do ambiente, a umidade relativa do ar e a ventilação têm que ser levada em consideração. Temperatura do ar de secagem elevada e umidades relativas baixas implicam

numa secagem mais rápida do material. Este efeito é mais acentuado que os gerados pelas relações área/volume e teor de umidade inicial (BATISTA, 2006).

Em geral, esta etapa deve estar sincronizada com o processo de queima. São poucos os trabalhos reportados na literatura, com relação ao problema da secagem na indústria cerâmica, com ênfase, a secagem de peças extrudadas. Assim, surge a necessidade de uma avaliação experimental das principais variáveis envolvidas no processo, que servirá como ferramenta de projetos e análises de secadores, buscando possíveis soluções para alguns problemas relacionados (SANTOS, 2001).

A secagem de alguns materiais, dos quais a argila é um bom exemplo, é acompanhada por uma contração do volume, devido à remoção da água. Por isso, é necessário que não ocorra altos gradientes de umidade no interior do material, durante a secagem e, conseqüentemente, zonas de retração diferenciada, que induzam tensões que podem comprometer à integridade do próprio material (SANTOS, 2001).

Devido as condições de secagem dos materiais cerâmicos serem relativamente críticas quanto à integridade dos mesmos, a velocidade de secagem deve ser condicionada à velocidade do fenômeno da migração da água, a qual deve ser relativamente lenta. Isto evita que a secagem superficial seja mais rápida e provoque fissuras na peça (LEHMKUHL, 2004).

De acordo com o mecanismo de transferência de calor predominante no processo, a secagem pode ser classificada como convectiva, condutiva ou radiativa. Na secagem convectiva, o ar aquecido, em contato com o material a ser seco, transfere calor para a superfície do material sólido, aquecendo-a e criando um gradiente de temperatura no interior do material. O aquecimento da água, por sua vez, aumentará a sua pressão de vapor, criando condições favoráveis para a transferência de massa de água do interior do material para o ar externo. Assim, é criado um gradiente hídrico nas camadas do material e, pelo mecanismo de difusão molecular, o líquido mais interno migra para a superfície, onde evapora e é carregado pelo ar de secagem externo, criando novos gradientes de umidade. Tais processos podem ser realizados em equipamentos como a estufa ou secadores tipo túnel, que são de simples construção e funcionamento. No entanto, os custos de energia associados são elevados e é esta etapa de secagem, muitas vezes, responsável pelos maiores custos de energia de todo o processo (MILMAN, 2002).

Segundo Cadé et al. (2005), é fundamental conhecer os efeitos da secagem e o seu controle, uma vez que estes alteram as propriedades físicas e químicas do produto, e tais alterações afetam sensivelmente os processos de transferência de calor e massa. Durante e após

a secagem de um produto cerâmico, fatores como elevados gradientes de umidade e de temperatura, que causam tensões termomecânicas no seu interior, devem ser controlados, para evitar defeitos irreversíveis ao produto (trincas e fraturas).

2.1.4.2.2 Estado da arte acerca da secagem de produtos cerâmicos

Ao longo do tempo vários estudos e análises vem sendo validados, a fim de compreender o fenômeno da secagem em materiais cerâmicos. Dessa forma, a presente seção visa apresentar alguns destes trabalhos.

a) Secagem do bloco cerâmico: Modelagem, simulação e experimentação

Silva et al. (2011) apresentaram uma modelagem matemática tridimensional para prever o transporte de calor e massa dentro do tijolo industrial com furos retangulares durante a secagem, incluindo o encolhimento e análise de tensões termohidromecânicas. A solução numérica da equação de difusão foi obtida pelo Método de Volume Finito, considerando propriedades termofísicas constantes e condições convectiva na superfície do sólido. Os resultados da distribuição de temperatura, teor de umidade, tensões e cinética de secagem e aquecimento são apresentados e analisados. Os resultados do teor de umidade médio e da temperatura na superfície do tijolo ao longo do processo de secagem são comparados com os dados experimentais ($T = 80^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 4,6\%$) e uma boa concordância foi obtida. Verificou-se que as áreas próximas à superfície interna e externa (vértice) do tijolo apresenta as maiores taxas de transferência de calor e massa e maior variação de volume e tensões, portanto são áreas mais suscetíveis às rachaduras, fissuras e deformações, podendo até contribuir para a fratura total do material.

Silva et al. (2012) desenvolveram um estudo experimental de secagem de tijolos. Para os experimentos de secagem, tijolos industriais argilosos foram secos em estufa sob condições controladas de velocidade, temperatura e umidade relativa do ar. Os experimentos de secagem contínua terminaram quando a massa alcançou peso constante. Para obter o teor de umidade de equilíbrio, cada amostra foi mantida sob a mesma temperatura do ar de secagem por 48 horas dentro do forno. Os testes foram realizados sob pressão atmosférica. Os resultados das cinéticas de secagem e aquecimento e variações de volume durante o processo são mostrados e analisados. Verificou-se que a temperatura do ar tem grande influência na taxa de secagem durante o processo e que os maiores gradientes de temperatura, umidade e tensão estão

localizados nos vértices do tijolo. O processo de secagem ocorre no período de taxa de secagem decrescente.

Lopez e Cortes (2013) desenvolveram um estudo sobre a transferência de umidade durante a secagem de tijolos, analisada pelos perfis de temperatura e umidade relativa que estão associados com os períodos de taxa de secagem. Descreve também, o comportamento dos perfis de umidade e o instante em que o teor de umidade crítico aparece. Os resultados mostraram que os perfis de temperatura e umidade relativa são úteis para descrever a transferência de massa durante o processo de secagem.

Almeida et al. (2013) estudaram um modelo matemático e a sua solução numérica que descreve a secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador industrial do tipo túnel e fluxos cruzados. O modelo baseia-se nos balanços energéticos de massa escritos por um volume diferencial situada numa posição arbitrária do material sólido e incluem a condensação de água. Foram obtidas a solução numérica das equações governantes a partir do método dos volumes finitos e o esquema de interpolação para os termos convectivos. Para validar a metodologia, os resultados numéricos e experimentais do teor de umidade e a temperatura durante a secagem do tijolo foram comparados e foi obtida uma boa correlação. Os resultados da simulação mostraram que, durante o processo de secagem, baixos gradientes de temperatura e teor de umidade, no interior do leito, foram obtidos. Isso deu-se devido ao fato de que a temperatura do ar de secagem foi aumentada gradualmente e, conseqüentemente, a sua umidade relativa também aumentou gradualmente no final do processo, resultando em uma secagem mais uniforme e um produto de melhor qualidade.

Almeida et al. (2014) estudaram de forma experimental a secagem de tijolos de argila. Os tijolos industriais foram secos em forno com condições controladas de velocidade, temperatura (constante e variável) e umidade relativa do ar. A secagem contínua dos tijolos terminou quando a massa atingiu peso constante. Os testes experimentais foram realizados sob pressão atmosférica. Os resultados das cinéticas de secagem e aquecimento e as variações de volume durante o processo são mostrados e analisados. Verificou-se que o processo de secagem ocorre no período da taxa de secagem decrescente, e que temperatura do ar tem grande influência na taxa de secagem durante o processo. Verificou-se que os maiores gradientes de temperatura e do teor de umidade, e as tensões estão localizados nos vértices do tijolo.

Tavares et al. (2014) apresentaram um estudo sobre a secagem de tijolos vazados industriais em um secador túnel de fluxos cruzados. O modelo teórico é baseado nas equações de conservação de energia e massa aplicadas ao ar de secagem e ao produto. Para validar a

metodologia, foram comparados os resultados numéricos com os experimentais do teor de umidade e da temperatura do tijolo e uma boa correlação foi obtida. Resultados do teor de umidade e temperatura do produto e temperatura, umidade relativa e umidade absoluta do ar de secagem em função do tempo de secagem e posição no secador foram apresentados, analisados e comparados com dados experimentais reportados na literatura, obtendo-se uma boa concordância. Verificou-se que a secagem a temperaturas e umidades relativas moderadas obtém um produto de boa qualidade pós-secagem.

Nascimento et al. (2015) desenvolveram um estudo experimental sobre o comportamento das argilas durante o processo de secagem. Testes experimentais foram realizados com material de argila para produção de cerâmica vermelha e cerâmica branca (ball clay). Foram levadas em consideração diferentes dimensões e o teor de umidade inicial do material, além da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem. Foram mostradas e analisadas as cinéticas de secagem e alterações de volume de amostras em forma de paralelepípedo. Verificou-se que as temperaturas do ar de secagem e a forma do corpo têm uma enorme influência na taxa de secagem. O processo de secagem ocorre durante o período de taxa decrescente de secagem e as mudanças de volume exibem dois períodos lineares.

Almeida et al. (2016) apresentaram um estudo teórico de secagem de tijolos vazados industriais em secadores túnel de fluxos cruzados. O modelo teórico é baseado nas primeira e segunda leis da termodinâmica aplicada ao sistema. Para validar a metodologia, os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do tijolo durante a secagem (em escala industrial) são comparados e uma boa concordância foi obtida. Resultados do teor de umidade e temperatura do produto e ar, e eficiências energéticas e exergéticas são apresentados e analisados. Eles concluíram que as condições do ar afetam o aquecimento e a perda de umidade do tijolo cerâmico e observaram que através da eficiência energética, o secador proporciona uma grande perda de energia cerca de 90% durante o processo de secagem.

Araújo et al. (2016) fizeram um estudo térmico transiente da distribuição de temperatura em um tijolo industrial devido ao fornecimento de energia do ar quente escoando no regime turbulento sobre o mesmo. O objetivo da análise foi fornecer dados para auxiliar na otimização do processo de secagem. O estudo foi efetuado por simulação numérica do escoamento utilizando o software ANSYS® CFX 15.1 e os resultados transientes são exibidos através de campos de temperatura e velocidade do ar, e da temperatura do tijolo. Percebeu-se que, quanto maior a velocidade de escoamento do ar, maiores serão os gradientes de temperatura. Os gradientes de temperatura sobre a superfície do tijolo permanecem mesmo após 1 hora de

passagem do ar quente sobre a superfície do tijolo; a turbulência observada é muito pequena para o ar escoando paralelamente à superfície do tijolo.

Brito et al. (2016) apresentaram um estudo analítico da secagem de sólidos paralelepípedicos. Desenvolveram um modelo matemático tridimensional transiente, baseado nas Leis de Fourier e de Fick, para prever a transferência de calor e massa que ocorre no sólido, considerando propriedades termo físicas constantes e condições de contorno de 3ª espécie (convecção). Todo o formalismo matemático e solução analítica via método de separação de variáveis das equações diferenciais parciais que compõem o modelo referenciado foram apresentadas. Para obtenção dos resultados, foi desenvolvido um código computacional no ambiente do Software Mathematica[®]. A aplicação foi dada a secagem de tijolos cerâmicos comuns e os resultados simulados das cinéticas de aquecimento e secagem do sólido paralelepípedo, bem como as distribuições do teor de umidade e temperatura durante o processo foram apresentados. Concluiu-se que o fluxo de umidade se dá do centro para superfície do sólido, e o fluxo de calor ocorre de forma inversa ao fluxo de umidade. Além disso, foi verificado que altos gradientes de umidade geraram tensões hídricas e que altos gradientes de temperatura geraram tensões térmicas. Segundo os autores, o controle do processo de secagem é de extrema importância pois, dependendo das tensões geradas no interior do material durante o processo, podem surgir deformações consideráveis nos produtos fabricados, aumentando assim os custos e prejuízos das empresas.

Martins et al. (2016) fizeram um estudo sobre simulação numérica referente a secagem convectiva de um tijolo de argila vermelha vazado com o emprego do software COMSOL[®] Multiphysics de modo a permitir uma análise do consumo e aproveitamento de energia no processo. Os resultados apresentam os campos de temperatura na peça e do escoamento do ar de secagem, além do perfil de umidade no domínio, fornecendo subsídios teóricos ao incremento de qualidade e economia na produção. A simulação levou em conta parâmetros operacionais observados na indústria. Ao final do estudo de simulação foi possível evidenciar a condição de equilíbrio para o transporte de massa e energia alcançada pelo meio poroso em relação ao ar de secagem e com isso concluir que o processo de secagem chegou ao fim.

Silva et al. (2016) analisaram o comportamento da transferência de calor e massa na secagem de sólidos vazados com forma arbitrária usando o método da capacitância global, com aplicação para a secagem de produtos cerâmicos. A solução analítica das equações governantes foi feita usando o método de separação de variáveis e foram obtidos resultados cinéticos de perda de massa e aquecimento de peças cerâmicas para diferentes condições. Observou-se que

o processo de perda de umidade ocorre a uma velocidade mais baixa do que o aquecimento do material cerâmico, devido ao fato de sua difusividade térmica ser maior do que a difusividade de massa, e que a temperatura e forma do corpo afetam fortemente os fenômenos de transporte de calor e massa.

Araújo et al. (2017) desenvolveram um estudo térmico transitório da distribuição de temperatura em um tijolo industrial, devido ao fornecimento de energia de ar quente fluindo em regime turbulento. O estudo foi realizado através de simulação numérica usando o software ANSYS® CFX. Os resultados transitórios foram exibidos em termos de campos da temperatura e velocidade do ar, e temperatura do tijolo. Os autores concluíram que, quanto maior a velocidade do ar quente, mais rápido o calor se difunde no tijolo, independente da velocidade do ar, há gradientes de temperatura na superfície do tijolo.

2.2 Análise estatística de dados

A análise estatística dos resultados obtidos em um determinado estudo é uma ferramenta importantíssima na validação desses dados, assim como para a adequada extrapolação dos resultados obtidos para a população estudada.

Há diversos parâmetros de análise de resultados obtidos, como por exemplo, aqueles relacionados a medidas de dispersão, variância, desvio padrão, erro percentual, correlação de Person, teste t-Student e intervalo de confiança. A seguir são discutidos brevemente cada uma delas.

2.2.1 Medidas de dispersão

a) Variância e desvio padrão

Os desvios entre os valores experimentais e calculados e a variância de um determinado parâmetro são respectivamente, como segue:

$$ERMQ = \sum_{i=1}^n (\Phi_{i,Num}^* - \Phi_{i,Exp}^*)^2 \quad (2.1)$$

$$S^2 = \frac{ERMQ}{(n - \hat{n})} \quad (2.2)$$

onde n é o número de pontos experimentais, \hat{n} o número de parâmetros ajustados (número de graus de liberdade), $\Phi_{i,Num}^*$ é o valor experimental de uma determinada variável em um

determinado instante de tempo e $\Phi_{i,Exp}^*$ é o valor experimental de uma determinada variável em um determinado instante de tempo (FIGLIOLA E BEASLEY, 1995).

Segundo Silva (2009), os menores valores de ERMQ e S^2 obtidos assegura os melhores ajustes do coeficiente de difusão D (parâmetros de interesse).

b) Erro relativo percentual (Desvio Relativo)

O erro relativo percentual indica quão os dados não se ajustaram aos dados experimentais, e pode ser calculado como segue:

$$ER = 100 \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{|\Phi_{i,Exp} - \Phi_{i,Num}|}{\Phi_{i,Exp}} \right). \quad (2.3)$$

c) Coeficiente de correlação linear de Pearson

O coeficiente de correlação linear de Pearson (r) é uma estatística utilizada para medir a força, a intensidade ou o grau de relação linear entre duas variáveis aleatórias, também conhecido como Coeficiente de Correlação do Momento Produto. (Stevenson, 2001; Bunchaft & Kellner, 2002; Barbetta et al., 2004; Kazmier, 2007; Ferreira, 2009). Este foi o primeiro método de correlação, estudado por Francis Galton e seu aluno Karl Pearson, em 1897 (SCHULTZ e SCHULTZ, 1992). Este coeficiente de correlação é utilizado na Análise de Componentes Principais, Análise Fatorial, Análise de Confiabilidade, entre outras. Este foi a outra medida estatística usada para a análise dos ajustes o qual indica o quanto os dois conjuntos de dados, com “n” valores cada, representados respectivamente por y_i e $y(x_i)$, estão correlacionados entre si. Neste caso, o primeiro conjunto de dados representa os valores y_i dos pontos experimentais, enquanto que o segundo representa os valores $y(x_i)$ obtidos pela função ajustada, equivalentes aos valores experimentais y_i . Como se sabe, o coeficiente de determinação, r^2 é o quadrado do coeficiente de correlação, r . Então, pode-se calcular o valor do coeficiente de determinação a partir do coeficiente de correlação, que é definido como a razão entre a covariância entre y_i e $y(x_i)$ e o produto dos desvios padrão destas duas séries, como segue a Equação (2.4).

$$r = \frac{\sum y_i y(x_i) - n \bar{y} \bar{y}(x)}{\sqrt{(\sum y_i^2 - n \bar{y}^2)(\sum y(x_i)^2 - n \bar{y}(x)^2)}}. \quad (2.4)$$

em que \bar{y} e $\bar{y}(x)$ são os valores médios das séries y_i e $y(x_i)$, respectivamente, n é o número de elementos de cada série, sendo que os somatórios são realizados de 1 até n .

Uma vez calculado o coeficiente de correlação r pode-se obter, também, o coeficiente de determinação r^2 . Esta medida varia entre zero e 1. No caso, de um ajuste perfeito, em que a função ajustada reproduz exatamente todos os pontos experimentais, o valor de r^2 é igual a 1. No pior caso, isto é, na ausência completa de correlação, esta medida é igual a zero.

Segundo a literatura (BUSSAB, 2006), os seguintes fatores afetam a intensidade do coeficiente de correlação: tamanho da amostra, (principalmente quando é pequena), os outliers (valores discrepantes), a restrição da amplitude de uma das variáveis ou de ambas e erros de medidas.

2.2.2 Distribuição t de Student

A t de Student é uma das distribuições mais utilizadas na estatística, apesar desta ter sido pouco explorada nos últimos anos, pois os pesquisadores vêm trabalhando com novas famílias de distribuições. Ela pode ser aplicada em trabalhos que vão desde a modelagem estatística até testes de hipóteses. Trata-se de um modelo de distribuição contínua que se assemelha à distribuição normal padrão. É utilizada para inferências estatísticas, particularmente, quando se tem amostras com tamanhos pequenos.

A distribuição t de Student foi publicada por Student, pseudônimo de William Sealy Gosset, que não podia usar seu nome verdadeiro para publicar trabalhos enquanto trabalhasse para a cervejaria Guinness (WALPOLE et al., 2011).

A distribuição t é uma distribuição de probabilidade teórica. É simétrica, campaniforme, e semelhante à curva normal padrão, porém com caudas mais largas, ou seja, uma simulação da t de Student pode gerar valores mais extremos que uma simulação da normal. O único parâmetro ν que a define e caracteriza a sua forma é o número de *graus de liberdade*. Quanto maior for esse parâmetro, mais próxima da normal ela será.

Ao se estudar distribuição de probabilidade, um parâmetro importante é o intervalo de confiança.

Patino et al. (2015), conceitua intervalo de confiança como sendo uma medida de imprecisão do verdadeiro tamanho do efeito na população de interesse (diferença entre duas

médias ou risco relativo, por exemplo) estimado na população de estudo. Essa imprecisão ocorre em virtude do erro amostral causado pela subamostragem da população de interesse. No entanto, a estimativa calculada na população de estudo é sempre a melhor estimativa do tamanho do efeito na população de origem.

Neyman (1937) define o intervalo de confiança (IC), como sendo um tipo de estimativa de um parâmetro populacional desconhecido. O mesmo introduziu na estatística, como sendo um intervalo observado (calculado a partir de observações) que pode variar de amostra para amostra e que, com dada frequência (nível de confiança), inclui o parâmetro de interesse real não observável.

A importância de se determinar um intervalo de confiança é devido pelo qual, o mesmo indicar a incerteza ou imprecisão acerca do tamanho do efeito calculado usando a amostra de estudo para estimar o verdadeiro tamanho do efeito na população de origem. Calcular o intervalo de confiança é uma estratégia que leva em conta o erro amostral: o tamanho do efeito e seu intervalo de confiança representam valores plausíveis para a população de origem, e quanto mais estreito é o intervalo de confiança, maior é a certeza de que a estimativa baseada na população de estudo representa o verdadeiro tamanho do efeito na população de origem. Um intervalo de confiança (IC) é um intervalo estimado de um parâmetro de interesse uma população (PATINO et al., 2015).

O intervalo de confiança com nível de confiança de 95% é o mais comum e significa que o resultado está dentro do intervalo de 95 dos 100 estudos hipoteticamente realizados (a leitura correta é que o resultado está dentro do intervalo de confiança em 95 das 100 amostras realizadas). O tamanho do intervalo de confiança pode ser influenciado pelo tamanho da amostra, pelo nível de confiança e por variações diversas. Lembrando que uma amostra maior conduzirá a uma estimativa melhor do parâmetro analisado (MAGALHÃES, 2001).

Como os dados observados são amostras aleatórias da população, o intervalo de confiança construído a partir dos dados também é aleatório. Entretanto, o intervalo de confiança calculado a partir de uma amostra particular não inclui necessariamente o valor real do parâmetro. Quando se tem 99% de confiança de que o valor real do parâmetro está no intervalo de confiança, significa que 99% dos intervalos de confiança observados têm o valor real do parâmetro. Tomando-se qualquer amostra particular, o parâmetro populacional desconhecido pode ou não pode estar no intervalo de confiança observado (NEYMAN, J. 1937).

Segundo Kendall et al. (1973), o nível de confiança é a frequência com a qual o intervalo observado contém o parâmetro real de interesse quando o experimento é repetido várias vezes.

Em outras palavras, o nível de confiança seria a proporção de intervalos de confiança construídos em experimentos separados da mesma população e com o mesmo procedimento que contém o parâmetro de interesse real. Em geral, refere-se a intervalo de confiança quando as duas extremidades de estimativa intervalar são finitas. Entretanto, refere-se a limiares superiores/inferiores de confiança quando uma das extremidades é infinita. O nível de confiança desejado é determinado pelo pesquisador, não pelos dados. Se um teste de hipótese for realizado, o nível de confiança é o complemento do nível de significância. Isto é, um intervalo de confiança de 95% reflete um nível de significância de 0,05 (FIELD, 2013).

Segundo Zar (1984), os intervalos de confiança são tipicamente estabelecidos no nível de confiança de 95%. Entretanto, quando apresentados graficamente, os intervalos de confiança podem ser mostrados em vários níveis de confiança como 90%, 95% e 99% (ZHOU, 2017). Certos fatores podem afetar o tamanho do intervalo de confiança, incluindo o tamanho da amostra, o nível de confiança e a variabilidade da população. Um tamanho de amostra maior normalmente levará a uma estimativa melhor do parâmetro populacional. O intervalo de confiança contém os valores do parâmetro que quando testados não devem ser rejeitados com a mesma amostra. O intervalo de confiança de diferença do parâmetro entre duas populações que não contém zero, implica uma diferença significativa do mesmo parâmetro entre as populações (SULLIVAN, 2017).

O intervalo de confiança para a distribuição t-student é determinado pela seguinte expressão (BUSSAB, 2006):

$$y_i^m - t_{\frac{\alpha}{2}} \hat{\sigma}_i < y_i < y_i^m + t_{\frac{\alpha}{2}} \hat{\sigma}_i \quad (2.5)$$

onde y_i^m é o valor de y correspondente aos dados amostrais, $t_{\frac{\alpha}{2}}$ é o valor da área sob a

distribuição t-student para um nível de significância de $\alpha / 2$, α nível de significância e $\hat{\sigma}_i$ representa o desvio padrão, que é calculado por:

$$\hat{\sigma}_{y_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_{i,Exp} - \Phi_{i,Num})^2}{n - 1}} \quad (2.6)$$

onde $\Phi_{i,Exp}$ é o valor experimental de uma determinada variável em um determinado instante de tempo, $\Phi_{i,Num}$ é o valor numérico de uma determinada variável em um determinado instante de tempo e n é o número de pontos amostrais.

2.3 Fluidodinâmica computacional

A simulação numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor e de Massa, comumente conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*) ou, ainda, como, Fluidodinâmica Computacional é uma ferramenta poderosa para resolver problemas de engenharia envolvendo Fenômenos de Transporte. Ela permite prever qualitativamente e quantitativamente, o comportamento de um ou mais fluidos escoando em presença de outros fenômenos físicos, tais como: troca de calor, transferência de massa, mudança de fase, reações químicas e entre outros (CAVALCANTI et al., 2005).

Atualmente, a engenharia, utiliza o CFD como uma forma de reduzir tempo e custos de desenvolvimentos de projetos que envolvem escoamento de fluidos (MARINHO et al., 2012; VERSTEEG & MALALASEKERA, 1995). O contínuo aumento da capacidade computacional disponível tem impulsionado fortemente a utilização dessa ferramenta. Processadores mais rápidos e *clusters* de computadores com baixo custo aproximaram CFD do meio industrial, deixando de ser exclusividade dos centros de pesquisa. Atualmente, CFD também é uma área da engenharia, que surgiu como consequência natural do crescimento do poder de solução das ferramentas teóricas para a solução de problemas. É certo que as equações que se busca resolver são as mesmas deduzidas de *Navier-Stokes* em 1822, mas apenas nas últimas décadas é que elas estão sendo resolvidas como auxílio importante à engenharia, em função, principalmente, do crescimento dos computadores e, como consequência, dos métodos numéricos e ferramentas computacionais (BURITI, 2016).

Os métodos analíticos e os numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos têm como objetivo resolver equações diferenciais. A diferença entre os dois métodos está centrada no grau de complexidade das equações que cada método pode resolver. Os métodos analíticos têm a desvantagem de ser aplicável apenas em problemas cujas hipóteses simplificadas os desviam demasiadamente do fenômeno físico, sendo aplicado, normalmente, a geometrias e condições de contorno simples (PEREIRA FILHO, 2010).

Em relação aos métodos experimentais, sua grande vantagem é o fato de tratar o problema com a configuração real. Entretanto, tratar o problema em uma configuração real acarreta um alto custo e muitas vezes não se pode realizar, por questões de segurança ou pela dificuldade de reprodução das condições reais.

Apesar dos problemas que estão atrelados ao método experimental, na ausência de modelos matemáticos estabelecidos e em geometrias extremamente complexas, muitas vezes é a única alternativa para a solução do problema (SARMENTO, 2014). Os métodos numéricos,

por sua vez, quase não apresentam restrições, podendo resolver problemas com complicadas condições de contorno, definidos em geometrias arbitrárias e apresentando resultados com rapidez (SARMENTO, 2014).

Para utilização da dinâmica de fluidos computacional, se faz necessário seguir algumas etapas, que inicia pelo entendimento do problema com a busca de informações importantes sobre os fenômenos existentes, como por exemplo, se o problema é transiente ou estacionário, se há turbulência, o tipo de fluidos e/ou materiais envolvidos, junto com suas propriedades e outras variáveis intrínsecas ao problema. Após essa etapa, faz-se necessário a geração da geometria do domínio do problema e depois esse é dividido em vários pequenos volumes discretos, criando, assim, o que é nomeado de malha. Logo em seguida é necessário especificar as condições de contornos para de tal forma torna-se-a possível a solução das equações governantes e das relações constitutivas (equações de estado, equações de transporte e equações de taxas de reações químicas). Por fim, é aplicado uma metodologia algorítmica que regirá os procedimentos para resolução das equações do problema e assim soluciona-los. Isso resultará numa criação de uma gama de resultados cujo permitirá analisar os fenômenos e os comportamentos das variáveis existente do problema.

Existem vários programas de CFD, sendo alguns comerciais e outros livres. Dentre os comerciais os mais populares são: ANSYS-CFX, ANSYS Fluent e Star-CCM+. Sendo o primeiro utilizado nessa pesquisa.

O pacote computacional Ansys CFX[®] é uma poderosa ferramenta no estudo no campo da fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD).

O ANSYS CFX é um software comercial com capacidade de simular escoamentos de fluidos e transferências de calor em geometrias bi/tridimensionais, utilizando o método dos volumes finitos para discretizar as equações de conservação e as relações constitutivas. Uma simulação nesse software inicia com a geração de malha ou importação da malha, cujo pode ser gerada em softwares específicos, como o ICEM CFD, depois o ANSYS CFX é utilizado para definir os modelos físicos, as condições fronteiras, as propriedades dos materiais, o método para a resolução do sistema de equações e, consecutivamente, o pós-processamento dos dados obtidos das soluções.

O software adota uma metodologia numérica utilizando malhas estruturadas, porém com flexibilidade de adaptação a geometrias complexas pelo uso de coordenadas curvilíneas generalizadas e a possibilidade de resolução de subdomínios (THOPSON et al., 1987; FLETCHER, 1997; WARSI, 1999; FERZIGER e PÉRIC, 2002; MALISKA, 2004).

Uma característica desse código computacional é que ele permite a inclusão de novos modelos ou a modificação dos já implementados, sejam esses para consideração de fenômenos físicos ou modificação de esquemas numéricos, através de subrotinas em linguagem Fortran. Isto torna o software adequado para a pesquisa científica, possibilitando testar diferentes modelos matemáticos, analisar a influência de determinados parâmetros, sem a necessidade do árduo trabalho de implementação numérica das equações de Navier-Stokes ou outros modelos matemáticos bastante difundidos na literatura.

2.4 Índice de Convergência de Malha e Estimativas de Erros de Discretização

De acordo com Bern e Plassmann (2000), a malha é definida como a discretização de um modelo geométrico em formas simples menores, como triângulos e quadrados, em casos de geometrias em duas dimensões, e tetraedros e hexaedros, no caso de geometrias em três dimensões. A malha é parte essencial na solução numérica de equações diferenciais parciais que surgem de problemas físicos.

Segundo Cunha (2014), é importante ter um controle da qualidade da malha para que se tenha um controle dos erros de discretização. Em outras palavras, para se obter soluções numéricas mais precisas é importante que se reduza a sua fonte de erros. Paudel e Saenger (2017) relatam que erros podem surgir de três tipos de fonte em uma simulação fluidodinâmica: dos dados de entrada, de aproximações feitas no modelo matemático ou na solução numérica das equações de Navier-Stokes, sendo que os do último tipo, em geral, são provenientes de malhas com pouco refinamento. Os erros de incerteza numérica não podem ser evitados, porém podem ser minimizados.

O método mais utilizado para se minimizar os erros provenientes de incerteza numérica é o refinamento sistemático de malhas. O índice de convergência de malha (ICM) é um parâmetro de estimativa de erro proposto por Roache (1994) com a finalidade de uniformizar e dar mais confiabilidade aos resultados de convergência de malha reportados na literatura. Este índice foi desenvolvido tendo como base a extrapolação de Richardson (Richardson e Gaunt, 1927), que parte do princípio de que as soluções discretas de equações diferenciais parciais possuem representações em série, em malhas com espaçamento definido.

Diversos trabalhos reportam as vantagens da utilização do método do ICM. Volk et al. (2017), estudaram malhas de um leito fixo e calcularam o ICM para simulações CFD com o método de elementos discretos. Neste estudo foram realizados refinamentos unidimensionais em malhas uniforme e não uniforme. Os autores indicam que, para se aplicar o método ICM,

deve-se ter um domínio em que se possa realizar refinamentos de malha de maneira uniforme, e ainda que refinamentos de malha na direção do escoamento reduzem significativamente o erro numérico.

Longest e Vinchurkar (2007) aplicaram o ICM para estudar a convergência de malha em um processo de deposição de partículas pela passagem de ar em bifurcações do trato respiratório, utilizando um modelo Lagrangeano. Foram comparadas malhas tetraédricas, hexaédricas e malhas híbridas, realizando-se refinamentos de malha. Os resultados mostraram que as malhas hexaédricas apresentam melhor acurácia, enquanto as híbridas apresentaram acurácia menor do que as demais, baseado no valor de ICM calculado.

No capítulo referente a metodologia será descrito de maneira mais detalhada como foi obtido o ICM.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as etapas realizadas nesta pesquisa, relacionadas ao estudo teórico da secagem do tijolo estrutural tipo compensador 07.

Toda a pesquisa foi desenvolvida na Universidade Federal de Campina Grande/Centro de Ciências e Tecnologia nas Unidades Acadêmicas de Engenharia Química/Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI) e de Engenharia Mecânica/Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (LCTF).

3.1 Definição do problema físico

A pesquisa trata do estudo teórico da secagem de tijolos cerâmicos vazados, conforme ilustra a Figura 3.1.

O tijolo estrutural utilizados nesta pesquisa é conhecido como compensador 07. Segundo a Cerâmica e Olaria ABCD (2018), este produto tem sido bastante utilizado no ramo da construção civil, levando-se em consideração as vantagens já mencionadas no capítulo 2. As dimensões do tijolo compensador 07, segundo Silva (2018), são 142x301x200 mm³.

Duas situações físicas foram consideradas:

- a) Assumindo que a secagem do tijolo compensador considera o coeficiente de transferência de massa infinito;
- b) Secagem de tijolo onde o coeficiente de transferência de massa é determinado a partir das equações de momento linear, transferência de energia e de matéria na interface do tijolo-ar de secagem em estufa.

Figura 3.1 Fotografia de um tijolo estrutural tipo compensador 07.



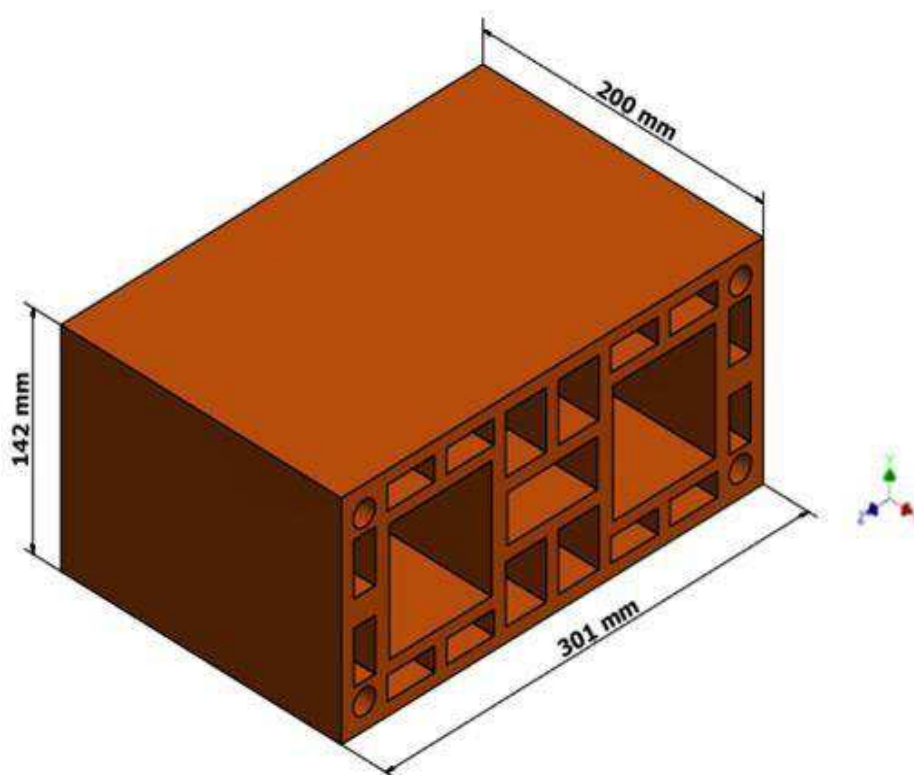
3.2 Domínio de estudo

3.2.1 As geometrias

3.2.1.1 O tijolo estrutural

O domínio correspondente ao tijolo estrutural estudado experimentalmente bem como suas dimensões estão apresentadas na Figura 3.2. Inicialmente foi tomado um corpo de prova real, o compensador 07, com as dimensões reportadas por Silva (2018). A representação geométrica do tijolo foi desenvolvida no software INVENTOR. A metodologia adotada para a criação da geometria do tijolo compensador 07 consistiu basicamente em confeccionar $\frac{1}{4}$ do tijolo por meio de definições de pontos, linhas e superfícies (Figura 3.3). Em seguida, utilizou-se uma função de duplicação espelhada da geometria para finalizar a forma do tijolo compensador 07. Finalizada, a geometria do tijolo é armazenada em um arquivo no formato (*.stp). Este formato é utilizado no ICEM CFD da Ansys 15. Assim, é possível a importação da geometria para, em seguida, confeccionar-se a malha computacional.

Figura 3.2 Geometria representativa do compensador 07.



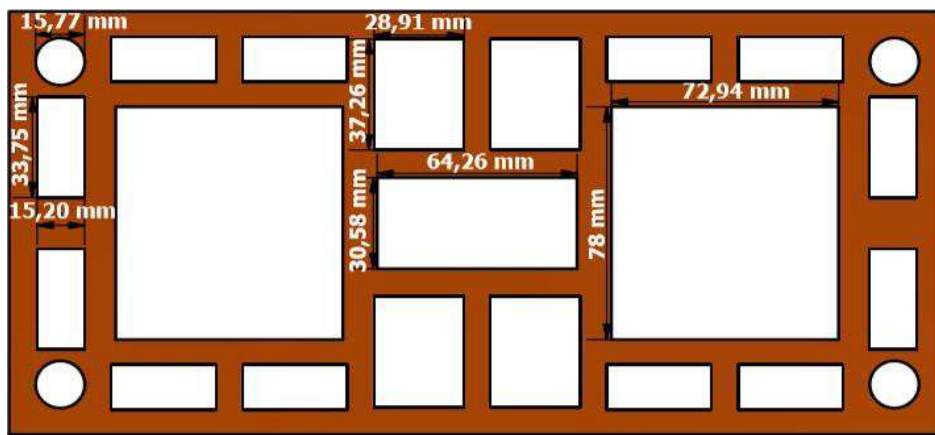
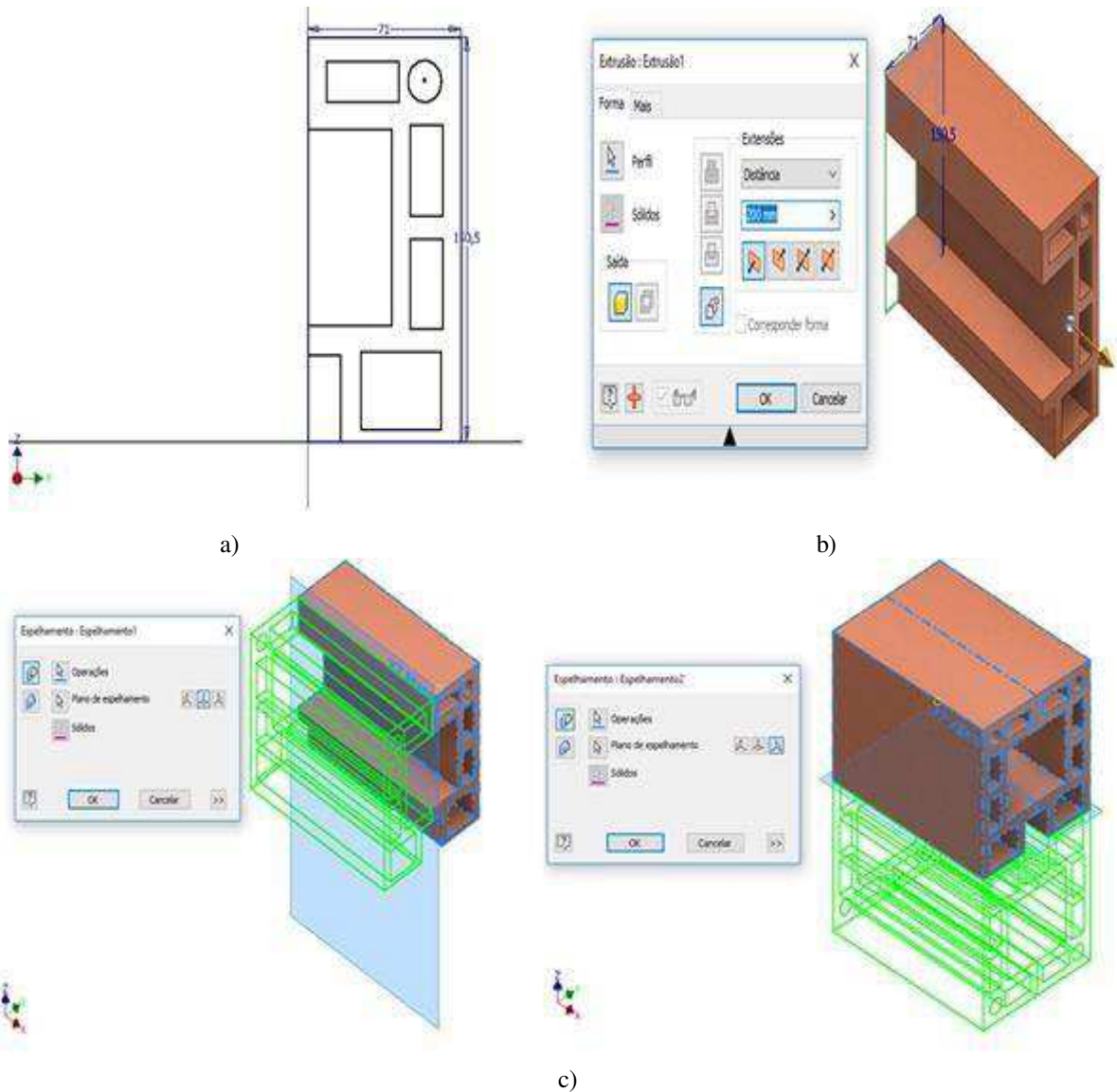


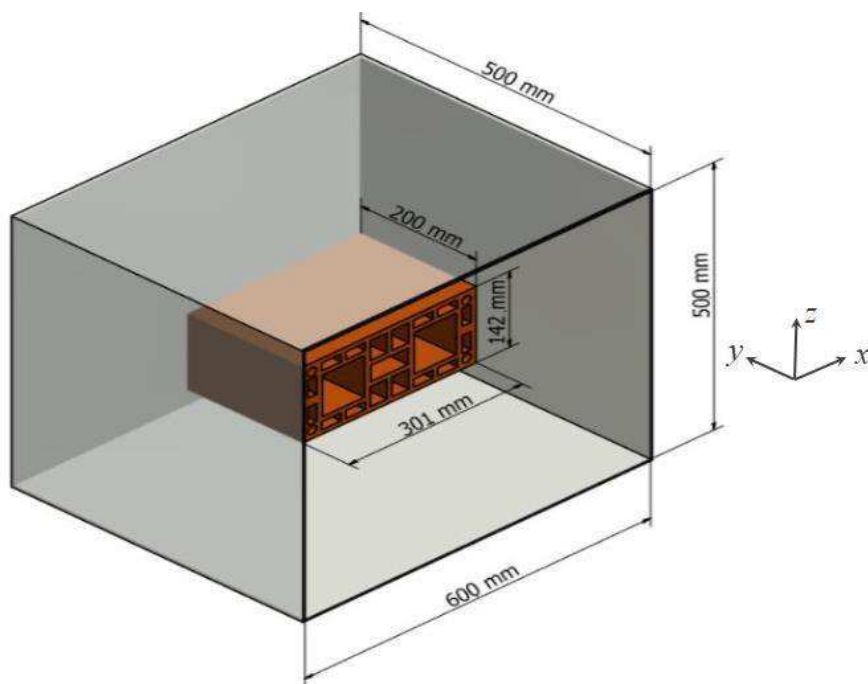
Figura 3.3 Etapas da construção da geometria: a) criação de ¼ do tijolo, b) criação da superfície por extrusão e c) criação da peça por duplicação espelhada.



3.2.1.2 O sistema tijolo/estufa

A Figura 3.4 representa os dois domínios tijolo-estufa bem como suas respectivas dimensões, vale ressaltar que as dimensões referentes a estufa, foram tomadas com base na estufa com circulação mecânica de fabricação da FANEM modelo 320E, modelo este utilizado por Silva (2018) em seus experimentos. A representação geométrica do sistema tijolo/estufa foi desenvolvida software INVENTOR. A metodologia adotada para a criação da geometria deste sistema consistiu basicamente em confeccionar uma montagem entre a geometria do tijolo e da estufa criadas no software. Finalizada a geometria a mesma é armazenado em um arquivo no formato (*.stp), o qual é utilizado pelo ICEM CFD da Ansys 15 para importação da geometria e, em seguida confeccionada a malha computacional.

Figura 3.4 Geometria representativa do compensador 07 no interior da estufa.



3.2.2 Malha numérica

Todos os procedimentos apresentados a seguir referente a geração da malha foram adotados para ambos os casos estudados: tijolo e sistema tijolo/estufa.

Inicialmente fez-se a importação do arquivo, no formato (*.stp), referente a geometria construída no Inventor, para ANSYS ICEM CFX 15.0. De posse da geometria definiu-se, para construção de blocos, uma estratégia de blocagem (Blocking > Create Block > Initialize

Blocks), este procedimento assegura o refinamento (ver Apêndice A) ou distribuições dos elementos nas proximidades das paredes do sólido e em regiões onde os gradientes de velocidade, pressão e/ou temperatura são importantes. Foram realizadas várias blocagens a fim de se obter malhas de boa qualidade e densidade de pontos nodais compatível com o limite computacional das máquinas (computadores) disponibilizados para as simulações. No presente trabalho, optou-se por uma malha não estruturada com elementos hexaédricos.

As Figuras 3.5 e 3.6 ilustram, respectivamente, as malhas numéricas do compensador e sistema compensador/estufa, com alguns de seus detalhes. Elas são formadas, respectivamente, por 41.496 elementos e 52.640 nós e 202.566 elementos e 231.108 nós, os quais foram obtidos após a realização de refinamentos e um estudo de dependência de malha.

3.3 Modelagem matemática

Nesta seção é apresentada a modelagem matemática utilizada para os estudos da fluidodinâmica, e transferências de massa e calor durante o processo de secagem do tijolo estrutural na presença e ausência da estufa.

Com o intuito de realizar as simulações numéricas foram feitas algumas considerações, conforme descrito a seguir:

- a) A água migra no interior do sólido na forma líquida e evapora na superfície;
- b) O calor é transferido ao material por convecção na superfície e condução no interior do mesmo;
- c) Geração interna de massa e de calor desprezíveis;
- d) Regime de escoamento do fluido sobre o tijolo transiente, turbulento e não isotérmico;
- e) Efeito de encolhimento da peça cerâmica não foi considerado;
- f) Propriedades termofísicas e mecânicas constantes;
- g) Os coeficientes de transferência de massa e de calor convectivos são constantes para todas as faces do sólido.

3.3.1 Equações governantes

O fenômeno de secagem do tijolo compensador foi estudado com base nas equações de conservação de massa, momento linear, energia e de matéria. Estas equações são apresentadas a seguir levando-se em consideração as hipóteses adotadas.

Figura 3.5 Representação da malha numérica do compensador 07.

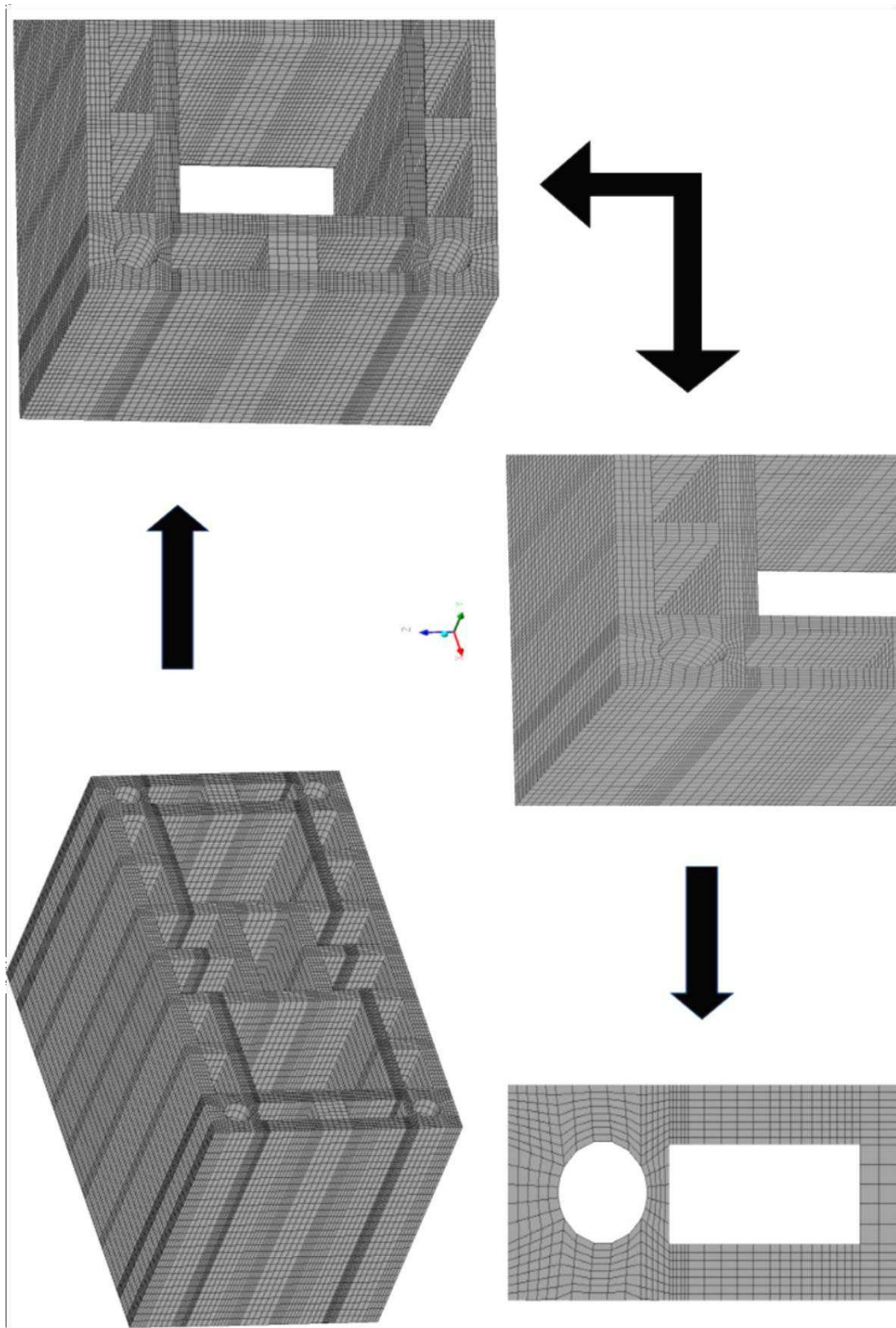
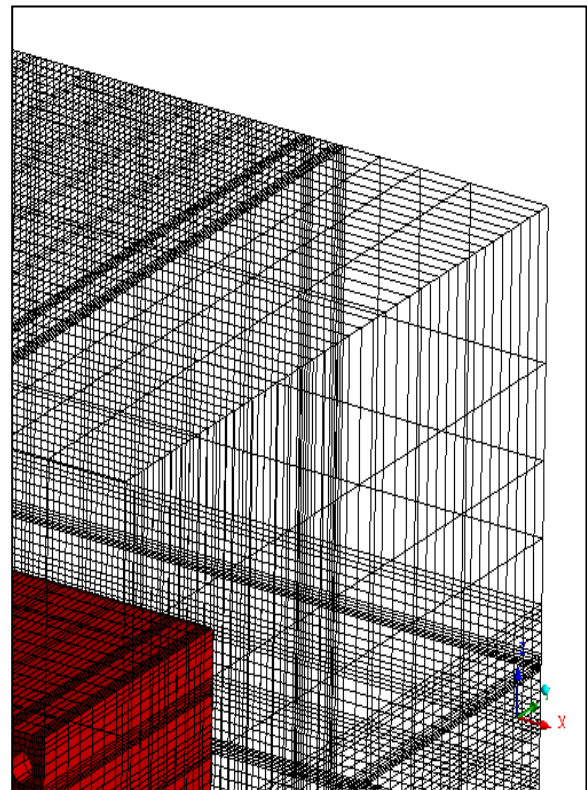
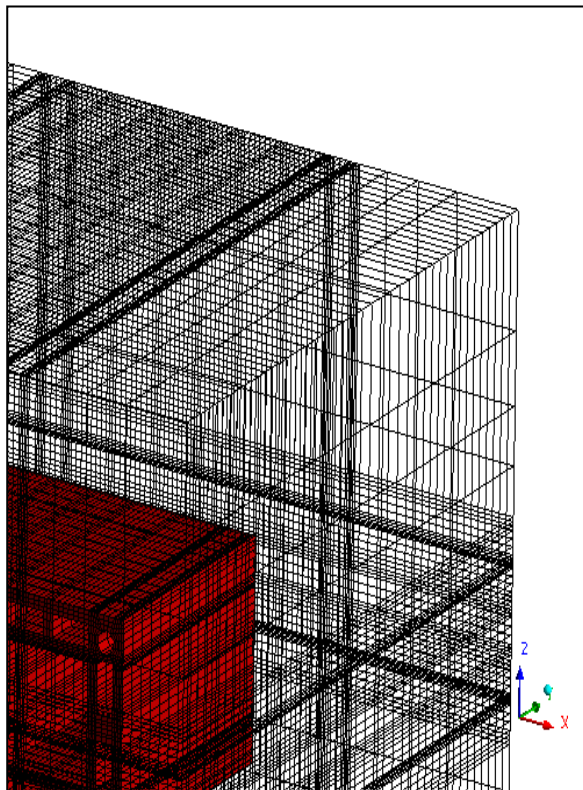
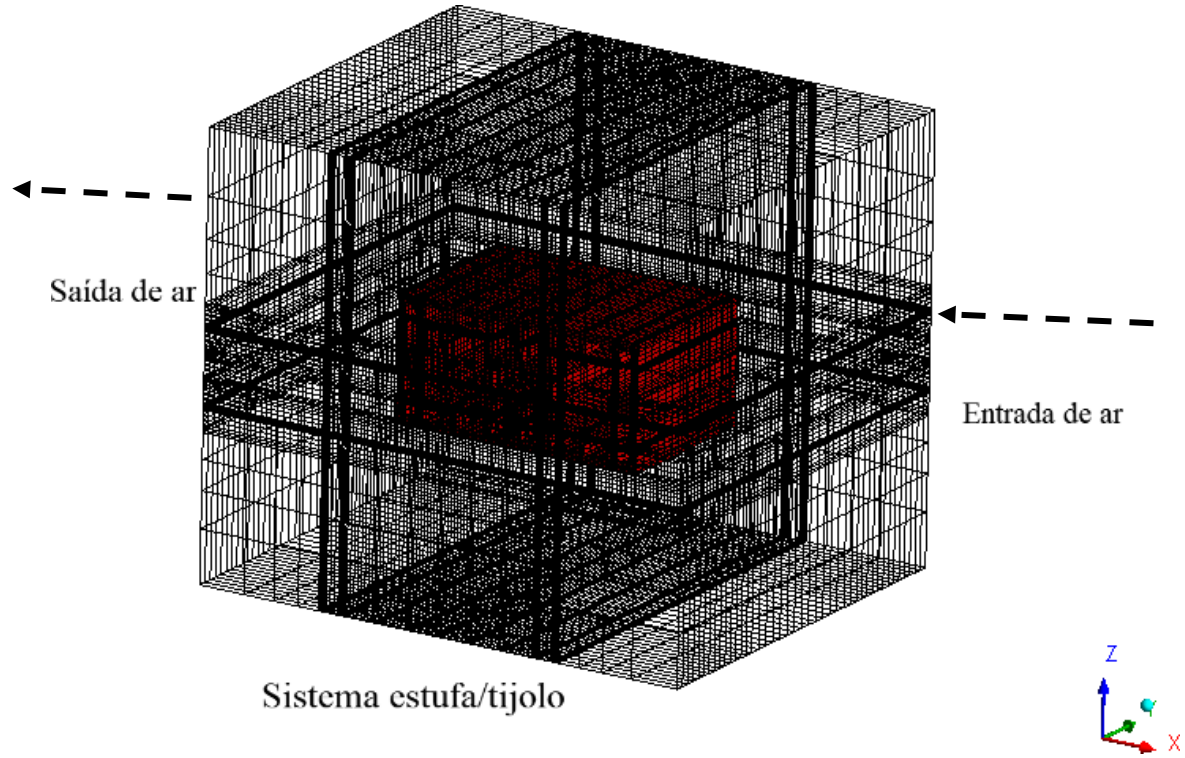


Figura 3.6 Representação da malha numérica do domínio estufa/tijolo.



3.3.1.1 Secagem de tijolo compensador

a) Conservação de massa

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla \cdot (D\nabla M) = 0. \quad (3.1)$$

b) Conservação de energia

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (k\nabla T) = 0. \quad (3.2)$$

onde ρ é a massa específica, H é a entalpia do ar, k é a condutividade térmica, T é a temperatura, M é o teor de umidade, D é o coeficiente de difusão de massa e t é o tempo.

c) Condições iniciais e de contorno

Foram adotadas as seguintes condições iniciais:

$$T(x, y, z, t = 0) = T_o. \quad (3.3)$$

$$M(x, y, z, t = 0) = M_o. \quad (3.4)$$

E como condições de contorno foi adotada em todas as faces do tijolo:

$$-k\nabla T = h_c (T_e - T), t > 0. \quad (3.5)$$

$$-D\nabla M = h_m (M - M_e), t > 0. \quad (3.6)$$

d) Teor de umidade médio

O teor de umidade médio, em cada instante de tempo, foi determinado usando a seguinte equação matemática:

$$M = \frac{1}{V} \int_V M DV \quad (3.7)$$

onde V é o volume do tijolo.

3.3.1.2 Secagem de tijolo em estufa

Para esta situação, além das Equações (3.1) a (3.7), para a fase sólida, utilizamos as seguintes equações para a fase fluída.

a) Conservação de massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0. \quad (3.8)$$

b) Conservação de momento linear

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) + \nabla p - \nabla \cdot \{\mu [\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T]\} = 0. \quad (3.9)$$

c) Conservação de energia

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} H - k \nabla T) = 0. \quad (3.10)$$

onde ρ é a massa específica, \vec{U} é o vetor velocidade, H é a entalpia do ar, p é a pressão, μ é a viscosidade do ar e t é o tempo.

d) A equação de transporte para uma variável adicional que descreve o fluxo de vapor de água no domínio fluido é:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (m \vec{U}) = \nabla \cdot (D_{ar} \Delta m). \quad (3.11)$$

onde m é a massa de vapor de água, \vec{U} é o vetor velocidade do fluido e D_{ar} é a difusividade do vapor de água considerado como um gás ideal.

e) Modelo de turbulência

Escolheu o modelo $\kappa - \varepsilon$ por ser o de maior aplicação industrial, cuja equação é dado por:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (3.13)$$

onde k e ε representam a energia cinética turbulenta e a dissipação, respectivamente, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k e σ_ε são constantes. P_{kb} e $P_{\varepsilon b}$ representam a influência das forças de empuxo e P_k é a produção de turbulência devido a forças viscosas, modelado como segue:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} - \rho k \right) \quad (3.14)$$

onde μ_t é a viscosidade da turbulência. O modelo $\kappa - \varepsilon$ assume que a viscosidade turbulenta está ligada à energia cinética turbulenta e a dissipação através da seguinte relação:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (3.15)$$

onde C_μ é uma constante.

Os seguintes valores das constantes foram usadas nas simulações: $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ e $C_\mu = 0.09$.

f) Condições iniciais e de contorno

Neste trabalho, utilizou-se os dados experimentais de secagem de um tijolo estrutural, nas seguintes condições: temperatura de secagem de 50 °C e 100°C, teor de umidade inicial de 0,1723191 e 0,169366 (kg/kg, b.s.) e umidade relativa do ar 18,39% e 2,34%, respectivamente, reportado por Silva (2018). Para os domínios sólido e fluído, as seguintes condições iniciais e de contorno foram usadas:

- Fase sólida

Para simular o processo de secagem, existem alguns limites algébricos e condições iniciais que devem ser adequadamente escolhidos para esta fase:

- ✓ Condição inicial
 - Temperatura do tijolo: $T_{tijolo,0}$;
 - Massa de água no tijolo: $m_{\acute{a}gua,0}$.

- ✓ Condição de contorno
 - Fluxo conservativo na interface.

- Fase fluída

- ✓ Condição inicial

As condições iniciais para a simulação numérica são adotadas para a massa de água inicial na estufa e no tijolo, de acordo com os seguintes dados:

- Massa de água inicial no interior da estufa: $m_{vapor,0}$;

- Massa inicial de água no interior do tijolo: $m_{\text{água},0}$;
 - Temperatura do ar no interior da estufa: $T_{\text{estufa},0}$;
 - Temperatura inicial do tijolo: T_0 .
- ✓ Condição de contorno
- Velocidade do ar na entrada da estufa: 1 m/s;
 - Vazão mássica de ar na entrada da estufa: $\dot{m}_{\text{ar seco}}$;
 - Vazão mássica de vapor na entrada da estufa: \dot{m}_{vapor} ;
 - Na parede da estufa foi considerada adiabática e impermeável;
 - Na saída consideram-se uma condição de pressão prescrita e igual a 101325 Pa.
- Interface do sólido com o fluido

Para modelagem matemática, adotou-se uma condição na interface de fluxo conservativo para as fases envolvidas. Essa condição de contorno significa que o fluxo da variável em um domínio passa pela interface e vai para o outro domínio sem perdas, tornando a variável uma condição de contorno de terceira espécie.

Neste caso, o fluxo difusivo de uma substância na superfície sólida é igual ao fluxo convectivo da mesma substância no ar. Portanto, podemos escrever:

$$-D_{\text{ar}}\nabla m = h_m(m - m_{\text{eq}}) \quad (3.16)$$

onde D_{ar} é a difusividade de massa de água no ar; m é a massa de água na interface; m_{eq} é a massa de água na condição de equilíbrio e h_m é o coeficiente convectivo de transferência de massa.

Para Equação (3.16), a única propriedade inicialmente estabelecida refere-se à difusividade de massa de água no ar.

Para a temperatura, o fluxo convectivo de calor é igual ao fluxo difusivo de calor na superfície:

$$-k_{\text{ar}}\nabla T = h_c(T_{\text{eq}} - T) \quad (3.17)$$

onde k_{ar} é a condutividade térmica do ar; T é a temperatura na interface; T_{eq} é a temperatura de equilíbrio e h_c é o coeficiente de transferência de calor convectivo.

3.4 Casos estudados

3.4.1 Casos experimentais

Esta pesquisa está aplicada a secagem de tijolos industrial do tipo compensador 07. Os dados utilizados nas simulações foram reportado por Silva (2018). Para obtenção destes dados, Silva (2018) procedeu experimentalmente como segue:

Foram realizadas algumas operações e medições antes das amostras serem colocadas na estufa:

- a) dimensionamento do compensador (largura, comprimento e altura);
- b) dimensionamento do furo circular (diâmetro);
- c) dimensionamento dos furos paralelepíedicos (largura e altura);
- d) medição da massa;
- e) temperatura do tijolo;
- f) temperatura do ar ambiente;
- g) umidade relativa do ar.

Em seguida, as amostras foram levadas ao interior da estufa onde se realizava a secagem. Nesse processo, a temperatura interna da estufa era fixada na temperatura desejada (50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C e 100°C) através do controlador de temperatura. Em intervalos pré-definidos a amostra era retirada da estufa, possibilitando a medição da temperatura, massa e dimensões da mesma.

As medições foram realizadas com intervalos de 5, 10 e 30 minutos, com 6 repetições cada uma, para todas as temperaturas pré-definidas. Depois, com intervalo de 60 minutos até a massa ficar constante. Logo após a amostra foi submetida a uma secagem por 24 horas, à temperatura constante para obtenção da massa de equilíbrio e em seguida, por mais 24 horas na temperatura de 100°C para obter a massa seca.

A Tabela 3.1 resume todas as condições experimentais analisadas nesta pesquisa.

Tabela 3.1 Parâmetros experimentais usados nas simulações numéricas.

Casos	Ar de Secagem			Tijolo Estrutural			
	T (°C)	v (m/s)	UR (%)	M_o (kg/kg, b.s.)	M_e (kg/kg, b.s.)	T_o (°C)	T_e (°C)
01	50	1,0	18,39	0,1723191	0,002685	31,5	50,5
02	60	1,0	12,27	0,173163	0,001834	32,0	58,0
03	70	1,0	7,72	0,170186	0,001189	29,8	64,7
04	80	1,0	4,99	0,172723	0,000826	30,5	68,6
05	90	1,0	3,56	0,167900	0,000511	27,6	76,2
06	100	1,0	2,34	0,169366	0,000054	27,5	95,1

Fonte: Silva (2018)

3.4.2 Parâmetros mássicos e térmicos do produto

Cálculos auxiliares foram desenvolvidos com base em dados experimentais reportado em Silva (2018), os quais foram utilizados nas simulações numéricas. Esses parâmetros auxiliares são dados a seguir:

a) Massa da água

A obtenção da quantidade de água no tijolo (m_a) em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de tijolo inicial (m_o) e da massa de tijolo seco (m_s), da seguinte forma:

$$m_a = m_o - m_s. \quad (3.18)$$

b) Teor de umidade médio em base seca

O cálculo para obtenção do teor de umidade em base seca do tijolo (\bar{M}) foi realizado com base no valor da massa do tijolo no tempo [$m(t)$], e da massa seca do tijolo (m_s), da seguinte forma:

$$\bar{M} = \frac{m(t) - m_s}{m_s}. \quad (3.19)$$

c) Teor de umidade médio adimensional

O cálculo para obtenção do teor de umidade médio adimensional no tijolo (\bar{M}) foi realizado com base no valor do teor de umidade em base seca (\bar{M}), do teor de umidade de equilíbrio (M_e) e do teor de umidade inicial (M_o), da seguinte forma:

$$\bar{M} = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (3.20)$$

d) Temperatura adimensional

O cálculo para obtenção da temperatura adimensional do tijolo (T^*) foi realizado com base no valor da temperatura do tijolo em função do tempo $[T(t)]$, da temperatura de equilíbrio (T_e) e da temperatura inicial (T_o), como segue:

$$T^* = \frac{T_o - T(t)}{T_o - T_e} \quad (3.21)$$

3.4.3 Parâmetros do ar de secagem

Os cálculos psicrométricos foram desenvolvidos com base em dados tabelados de (Çengel et al., 2007) e nos dados experimentais reportados em Silva (2018), os quais foram utilizados para determinar as condições de contorno utilizadas nas simulações numéricas. São elas:

a) Pressão de vapor

O cálculo para obtenção da pressão de vapor foi realizado com base na umidade relativa do ar (ϕ) e na pressão de saturação do vapor (P_{vapor}^{sat}), da seguinte forma:

$$P_{vapor} = \phi P_{vapor}^{sat} \quad (3.22)$$

b) Umidade Absoluta

O cálculo para obtenção da umidade absoluta (ω) foi realizado com base na pressão atmosférica (P) e na pressão de vapor (P_{vapor}^{sat}), da seguinte forma:

$$\omega = 0,622 \times \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} \quad (3.23)$$

c) Densidade do ar seco

O cálculo para obtenção da densidade do ar seco ($\rho_{ar\ seco}$) foi desenvolvido usando a lei dos gases ideais, expressa como função da temperatura absoluta e da pressão absoluta P , como segue:

$$\rho_{ar\ seco} = \frac{P}{RT} \quad (3.24)$$

onde R é constante específica do gás para o ar seco.

d) Vazão volumétrica

O cálculo para obtenção da vazão volumétrica ($W_{ar\ seco}$) foi realizado com base na velocidade do ar seco ($v_{ar\ seco}$) e da área da estufa (A_{estufa}), da seguinte forma:

$$W_{ar\ seco} = v_{ar\ seco} \times A_{estufa}. \quad (3.25)$$

em que a área da estufa (A_{estufa}) foi determinada da seguinte forma:

$$A_{estufa} = base \times altura \quad (3.26)$$

e) Vazão mássica do ar seco

O cálculo para obtenção da vazão mássica do ar seco ($\dot{m}_{ar\ seco}$) foi realizado com base na densidade do ar seco ($\rho_{ar\ seco}$) e na vazão volumétrica ($W_{ar\ seco}$), da seguinte forma:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_{ar\ seco} \times W_{ar\ seco}. \quad (3.27)$$

f) Vazão mássica do vapor de água

O cálculo para obtenção da vazão mássica do vapor de água (\dot{m}_{vapor}) foi realizado com base na umidade absoluta (ω) e na vazão mássica do ar seco ($\dot{m}_{ar\ seco}$), da seguinte forma:

$$\dot{m}_{vapor} = \omega \times \dot{m}_{ar\ seco}. \quad (3.28)$$

3.5 Procedimento numérico

As simulações foram realizadas em regime transiente, em um passo de tempo de 10 minutos, e um resíduo quadrado médio de 10^{-6} . O tempo total de secagem foi estabelecido de acordo com cada experimento. Os dados usados nas simulações são descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Dados usados nas simulações.

Domínio sólido				Domínio fluido				
$T_{tijolo,0}$ [°C]	$m_{água,0}$ [g]	$m_{água,eq}$ [g]	m_s [g]	$T_{estufa,0}$ [°C]	$m_{vapor,0}$ [g]	$\dot{m}_{ar\ seco}$ [g/s]	\dot{m}_{vapor} [g/s]	Tempo de secagem [min]
31,5	1067	108	7259	50	2,32254	273,09	3,8969	1170
32,0	1084	80	7344	60	2,43593	264,89	4,0871	1050
29,8	1064	55	7316	70	2,31458	257,17	3,8835	990
30,5	1079	41	7326	80	2,21823	249,89	3,7219	930
27,6	1044	29	7262	90	2,30237	243,01	3,8630	930
27,5	1056	14	7291	100	2,06551	236,50	3,4656	750

Para o domínio interno sólido, o qual se refere ao tijolo cerâmico, foi criado um novo material, chamado argila. As propriedades físico-químicas do ar e do produto estão expostas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Propriedades termofísicas do ar e da argila usadas nas simulações.

Propriedades	Ar	Argila
Condutividade térmica k [W m ⁻¹ K ⁻¹]	0,0261 ^(*)	1675 ^(**)
Calor específico c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	1004,4 ^(*)	1673 ^(***)
Densidade ρ [kg/m ³]	1,185 ^(*)	1985,8 ^(***)
Viscosidade dinâmica [kg m ⁻¹ s ⁻¹]	1,831x10 ⁻⁵ ^(*)	

Fonte: ^(*) Manual ANSYS (2015); ^(**) Almeida et al. (2013); ^(***) Çengel et al. (2012).

3.5.1 Estimativa dos coeficientes de transporte

A convecção é um mecanismo de transferência de calor pelo qual é transmitido por uma movimentação macroscópica de massa, implicando em dois sistemas envolvidos a temperaturas diferentes: um sólido e um fluido, que é o responsável pelo transporte de calor (deslocamento de massa). Combina condução com movimentação de massa e é característica de meios fluidos. Quando um fluido entra em contato com uma superfície sólida aquecida,

recebe calor por convecção, a densidade do fluido proporcionando a ascensão do mesmo, cedendo lugar ao mais frio. A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura e é expressa pela Lei de Newton do resfriamento, como segue:

$$Q_{conv} = h_c A_s (T_s - T_{ar}) . \quad (3.29)$$

onde h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A_s é a área superficial, T_s é a temperatura na superfície do tijolo, T_{ar} é a temperatura do ar e Q_{conv} é a taxa de transferência de calor por convecção.

O coeficiente de transferência de calor h_c , não é uma propriedade do material sólido. Este coeficiente, depende das propriedades do fluido (densidade, calor específico, viscosidade, condutividade térmica), a velocidade do fluido, geometria e rugosidade da superfície do objeto sólido que está em contato com o fluido. Um alto valor de h_c reflete numa alta taxa de transferência de calor (SINGH et al., 2009; ANTONIETTI et al., 2010).

O valor inicial do coeficiente de transferência de calor convectivo foi determinado com base nos dados experimentais disponíveis no trabalho de Silva (2018), e aplicando a seguinte equação:

$$h_c = \left(\frac{k_a}{D_h} \right) (0,023 Re^{-1/4} Pr^{-1/4}) . \quad (3.30)$$

onde D_h é o diâmetro hidráulico, k_a condutividade térmica do ar, Re é o número de Reynolds e Pr o número de Prandtl.

Na Tabela 3.4 estão representados os valores iniciais do coeficiente de transferência de calor convectivo para todos os experimentos analisados.

Tabela 3.4 Coeficiente de transferência de calor inicialmente determinado pela equação 3.30.

Casos	Temperatura [°C]	h_c (W/ m ² . °C)
01	50	3,9004
02	60	3,8131
03	70	3,7600
04	80	3,7051
05	90	3,6500
06	100	3,6142

Tomando-se o Caso 01, a título de informação da metodologia para a determinação do coeficiente de transferência de calor (h_c), inicialmente foi atribuído o valor para h_c calculado, como visto na Tabela 3.4. A partir da comparação entre a temperatura na superfície do tijolo obtida experimentalmente e por simulação, fez o ajuste de h_c , até obter-se um erro mínimo.

O valor do coeficiente de transferência de massa convectivo foi considerado como sendo infinito, que equivale a uma condição de contorno de equilíbrio higroscópico.

A estimativa do coeficiente de difusão de massa foi feita de forma similar ao coeficiente de transferência de calor convectivo, isto é, pela minimização do erro mínimo entre os dados preditos e experimentais Equação 2.1 e 2.2, deste feito, usando o teor de umidade médio do tijolo, ao longo do processo de secagem.

Para isso, usou-se como parâmetro inicial o valor de D reportado por Silva (2009).

A Tabela 3.6 resume os valores iniciais do coeficiente de difusão de massa reportado por Silva (2009).

Tabela 3.5 Coeficiente de difusão de massa.

Casos	Temperatura [°C]	D [m ² /s]
01	50	4,0 ×10 ⁻¹⁰
02	60	0,3 ×10 ⁻¹⁰
03	70	0,9 ×10 ⁻¹⁰
04	80	8,0 ×10 ⁻¹⁰
05	90	10 ×10 ⁻¹⁰
06	100	16 ×10 ⁻¹⁰

Fonte: Silva (2009)

Para assegurar que o valor do coeficiente de difusão de massa apresentou um bom ajuste, realizou um estudo estatístico baseado na distribuição t Student. Inicialmente realizou cálculos de medidas estatísticas, onde observou o desvio padrão e a variância. Em seguida, fez uma análise da correlação empregando a correlação de Pearson entre os dados, o qual indicou uma boa relação (ver Apêndice B). Para concluir, fez-se o uso da distribuição t Student com objetivo de obter o índice de confiança entre os dados experimentais e os resultados numéricos. Vale ressaltar que esta distribuição só é válida para pequenas amostras. Esta metodologia foi adotada para todas simulações realizadas nesta pesquisa.

3.6 Índice de Convergência de Malha (ICM)

Para o presente trabalho, foi realizado um estudo de convergência de malha. Este estudo foi realizado para os casos estudos de secagem do tijolo em estufa e considerando o coeficiente de transferência de massa infinito. O método utilizado é baseado na Extrapolação de Richardson, o qual se baseia no pressuposto que qualquer solução discreta possui uma representação em série. A ideia por trás deste método é de estimar a solução exata a partir da extrapolação das soluções das malhas existentes e pelo cálculo do índice de convergência relativo às malhas produzidas. Celik (2008) sugere 5 passos para determinar o índice de convergência de malha (ICM), e assim quantificar as incertezas em relação aos erros de discretização e determinar a melhor malha a ser utilizada nas simulações.

Inicialmente determinou-se um tamanho representativo do elemento de malha γ , de acordo com a Equação 3.31, como segue:

$$\gamma = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta V_i \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.31)$$

em que N é o número de elementos de malha utilizados para o cálculo computacional e ΔV_i é o volume ocupado pelo elemento i .

A partir deste valor determinado no primeiro passo, foram geradas três malhas, de modo que a razão $r = \frac{\gamma_{\text{grosseira}}}{\gamma_{\text{refinada}}}$ fosse maior do que 1,3 para cada malha. No presente trabalho adotou-se igual $\gamma = 2,0$. O refinamento das malhas deve ser feito sistematicamente, ou seja, devem ser utilizadas malhas com elementos de formatos similares.

Sejam γ_1 a malha mais refinada, γ_2 a malha intermediária e γ_3 a malha mais grosseira. Foram definidos os valores r_{21} e r_{32} , a partir das Equações 3.32 e 3.33.

$$r_{21} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \quad (3.32)$$

$$r_{32} = \frac{\gamma_3}{\gamma_2} \quad (3.33)$$

Os resultados de uma dada variável foram definidos como sendo \emptyset_1 , \emptyset_2 e \emptyset_3 para as respectivas malhas. Em seguida, foi determinada a ordem aparente p a partir das Equações 3.34, 3.35 e 3.36, que podem ser resolvidas utilizando um método numérico iterativo.

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln |\frac{1}{G} + q(p)|. \quad (3.34)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - S}{r_{32}^p - S} \right). \quad (3.35)$$

$$S = \text{sinal} \left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right). \quad (3.36)$$

em que $G = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}}$, $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$ e $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$.

Para verificar a convergência da solução, a Equação 3.37 foi utilizada, onde para $0 < C < 1$ é indicador de convergência monotônica, $C < 0$ indica convergência oscilatória e $C > 1$ indica divergência da solução (Paudel e Saenger, 2017).

$$C = \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_2 - \phi_3}. \quad (3.37)$$

Para a obtenção das soluções extrapoladas foi usada a Equação 3.38 a seguir:

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{(r_{21}^p \phi_1 - \phi_2)}{(r_{21}^p - 1)}. \quad (3.38)$$

Foi determinado o erro relativo aproximado entre as malhas de acordo com as Equações 3.39 e 3.40.

$$e_a^{21} = \frac{|\phi_1 - \phi_2|}{\phi_1}. \quad (3.39)$$

$$e_a^{32} = \frac{|\phi_2 - \phi_3|}{\phi_2}. \quad (3.40)$$

Dessa maneira, os índices de convergência de malha (ICM) foram determinados, como segue:

$$ICM_{21} = \frac{1.25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1}. \quad (3.41)$$

$$ICM_{32} = \frac{1.25 e_a^{32}}{r_{32}^p - 1}. \quad (3.42)$$

Para aplicar este método, é necessário garantir que as malhas estejam dentro do intervalo assintótico. Desta forma, Roache (1994) afirma que, em casos onde a solução exata não é

conhecida, as malhas estarão dentro do intervalo assintótico quando a seguinte equação matemática for satisfeita:

$$ICM_{32} \approx r^p ICM_{21}. \quad (3.43)$$

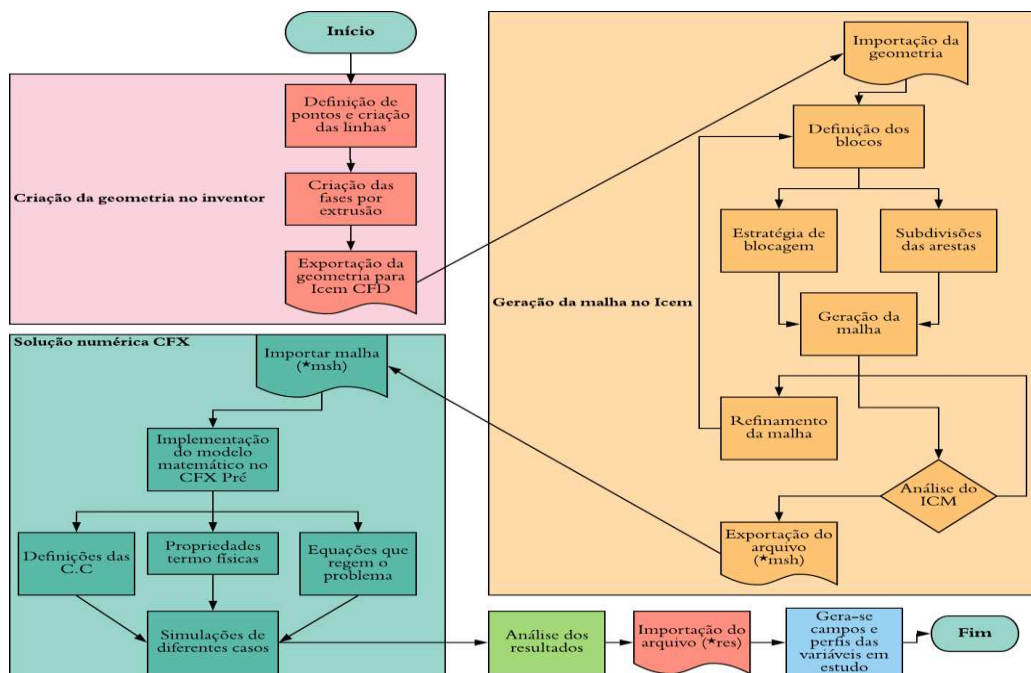
Nas simulações referentes ao refino de malha utilizou-se os dados contido na Tabela 3.7.

Tabela 3.6 Dados utilizados no refino das malhas.

Casos	T [°C]	D [m ² /s]	hc [W/m ² . °C]	hm [m/s]	Mo	Me	To[°C]	Te [°C]
Tijolo compensador	80	9×10 ⁻¹⁰	1	-	0,172723	0,000826	30,5	80
Tijolo compensador/ estufa	80	32×10 ⁻¹⁰	5,04715	5,04386	0,172723	0,000826	30,5	80

Na Figura. 3.7 está representado o fluxograma que ilustra as principais etapas realizadas no estudo numérico da secagem do tijolo estrutural tipo compensador 07. Para as simulações utilizou-se um computador Intel Core i7 3770 3.40 Ghz e 16 GB de memória RAM e os seguintes aplicativos computacionais: Invetor (versão estudante), ANSYS ICEM CFD® e ANSYS CFX® 15.0.

Figura 3.7 Fluxograma da metodologia adotada nas simulações numéricas.



CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados das simulações da transferência de calor e de massa no tijolo estrutural para dois estudos de caso de secagem, bem como um estudo da dependência de malha, estudo este baseado na metodologia mencionada na seção 3.6. Todas as simulações foram realizadas em regime transiente. Este capítulo se encontra dividido em duas seções. Na primeira seção é apresentado o estudo da dependência de malha para os dois estudos de caso de secagem e na segunda seção, apresentam-se os resultados da análise de secagem do tijolo isolado, bem como a secagem do tijolo na estufa. Ainda nesta seção é apresentado um estudo comparativo entre os problemas físicos considerados. Esta seção finaliza com um estudo da estimativa dos coeficientes de transporte obtidos.

4.1 Estudo da dependência de malha

A malha numérica é um dos elementos importantes para se gerar bons resultados numéricos em uma simulação CFD, todavia deve depender de alguns fatores como, relação entre o tamanho de cada elemento, de acordo com o elemento de referência (fator de expansão), quantidade de elementos tetraédricos e/ou hexaédricos, refinamento da malha, entre outros. Caso não se tenha uma malha adequada para um determinado estudo, pode-se ocasionar problemas sobre a precisão da solução, o tempo de simulação requerido, a taxa de convergência (ou divergência) dos resultados, entre outros.

Neste sentido realizou-se uma análise voltada para o estudo de dependência da malha, visando obter-se a malha mais adequada para ser utilizada nas simulações numéricas.

4.1.1 O tijolo compensador

Baseado na metodologia mencionada na seção 3.6, obteve-se os dados apresentados na Tabela 4.1, referente ao número de elementos de cada malha produzida. Para melhor compreensão, as malhas foram denominadas M1, M2 e M3, onde M1 é a malha mais refinada, M2 é a malha intermediária e M3 é a malha grosseira. A discretização da malha foi realizada de maneira uniforme (ver em Apêndice A).

A Figura 4.1 ilustra uma das malhas geradas e alguns detalhes do refinamento das mesmas. Para melhor visualização, foi ampliada a região do vértice para cada uma das malhas. Um maior refinamento junto às regiões de fronteira do domínio é necessário devido à presença

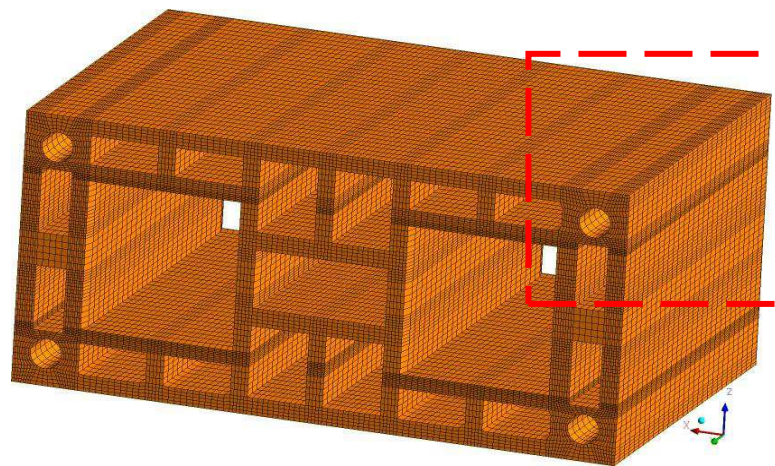
de altos gradientes de temperatura e umidade, sendo assim, para capturar com maior precisão o campo de temperatura e teor de umidade foi adotado tal refinamento.

Tabela 4.1 Dados quantitativos das malhas numéricas avaliadas.

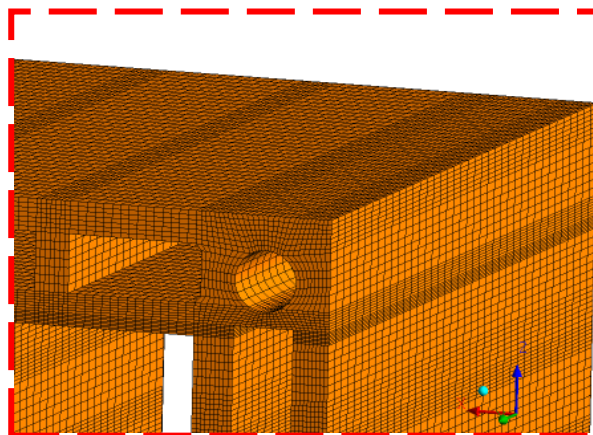
Malha	Número de elementos	Número de nós	$\gamma^{(*)}$	Tempo de simulação
M1	419.328	472.960	$2,05353 \times 10^{-3}$	1 dia 6 h 5 min 30,959 s
M2	169.940	198.120	$2,77533 \times 10^{-3}$	11 h 58 min 9,130 s
M3	41.496	52.640	$4,44253 \times 10^{-3}$	3 h 51 min 49,988 s

(*) Onde γ corresponde ao tamanho representativo da malha.

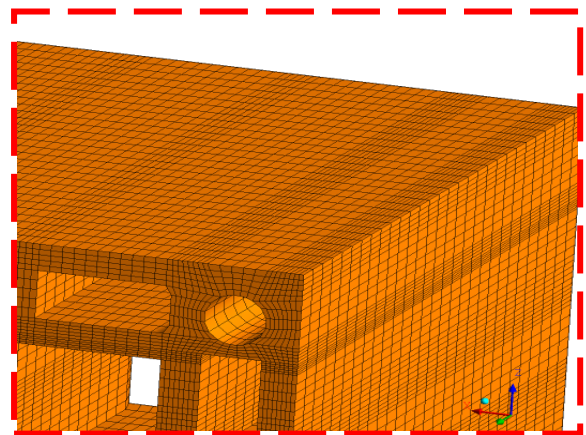
Figura 4.1 Representação da malha computacional do tijolo (a) e detalhes das malhas M1 (b), M2 (c) e M3 (d).



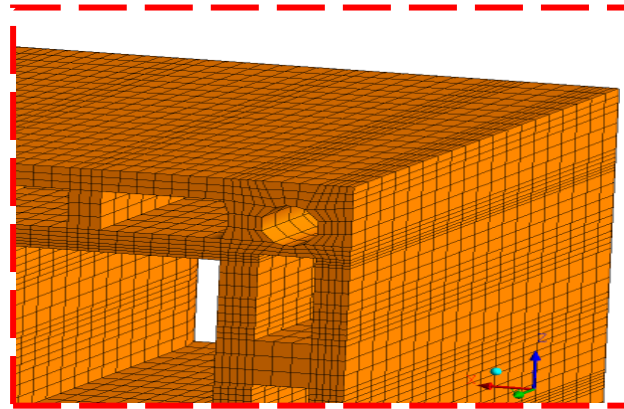
a)



b)



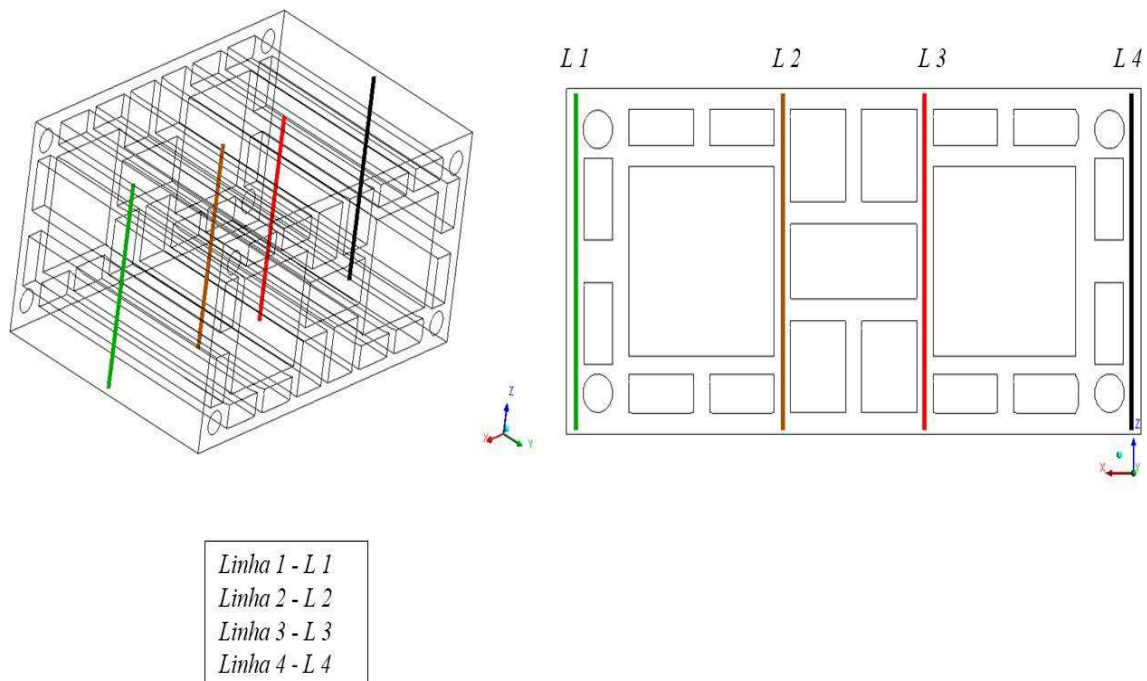
c)



d)

Destaca-se que, para a realização do estudo de dependência de malha, foram consideradas como condições de simulação, a construção de quatro linhas distribuídas ao longo do tijolo (Figura 4.2). Para a 1ª linha foram tomados dois pontos cujas coordenadas são: (0,037; 0,1; 0,0015) e (0,037; 0,1; 0,14), enquanto que, para linhas 2, 3 e 4, suas coordenadas foram: (0,1455; 0,1; 0,0015) e (0,1455; 0,1; 0,14), (-0,037; 0,1; 0,0015) e (-0,037; 0,1; 0,14), e (-0,1455; 0,1; 0,0015) e (-0,1455; 0,1; 0,14), respectivamente.

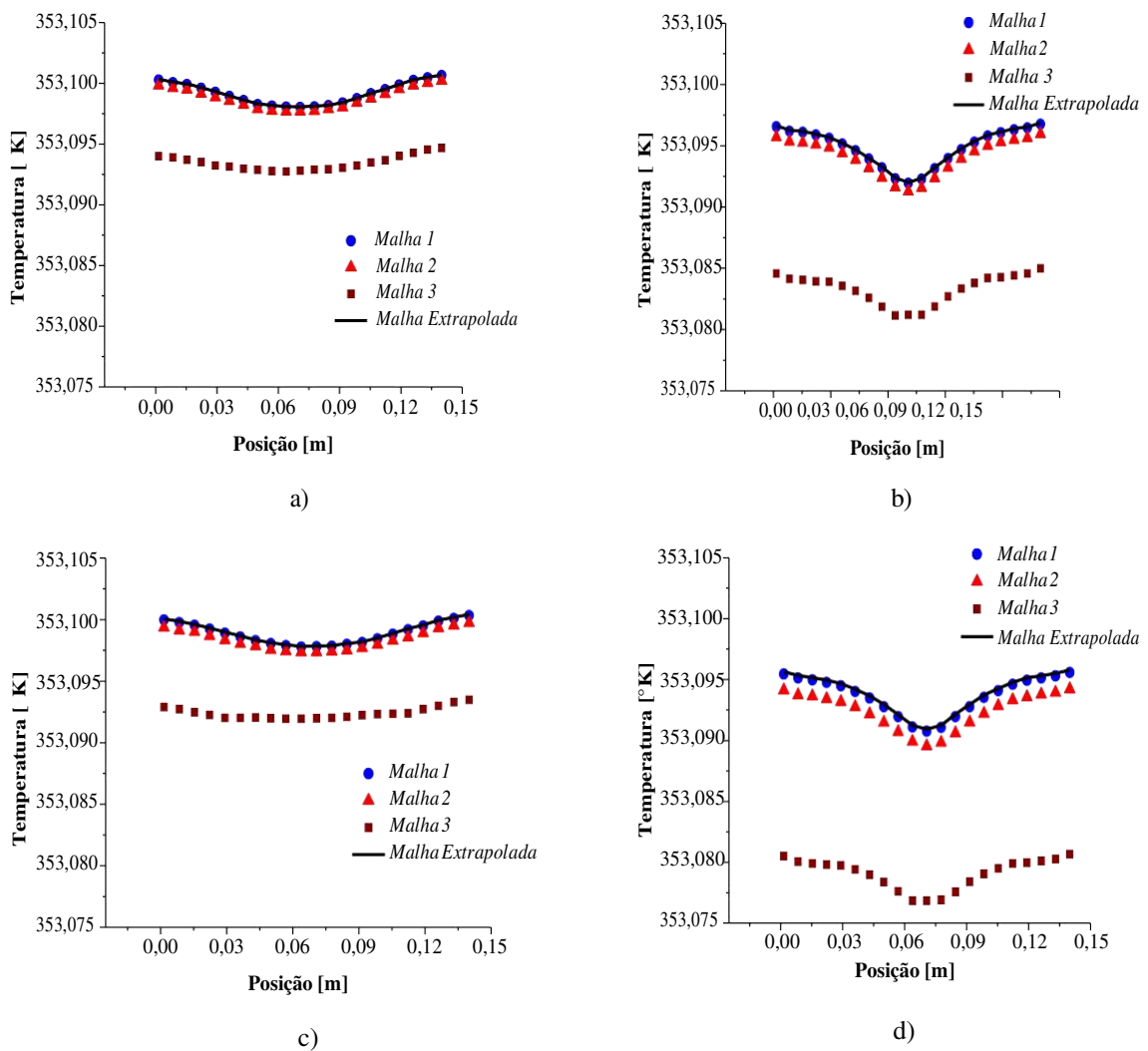
Figura 4.2 Linhas de análise ao longo do tijolo compensador usado no estudo de refino de malha.



As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram os valores da temperatura e teor de umidade do tijolo ao longo das linhas 1, 2, 3 e 4, para as malhas M1, M2 e M3, em comparação com a solução extrapolada no instante final do processo de secagem. Estes resultados indicam que, ao se

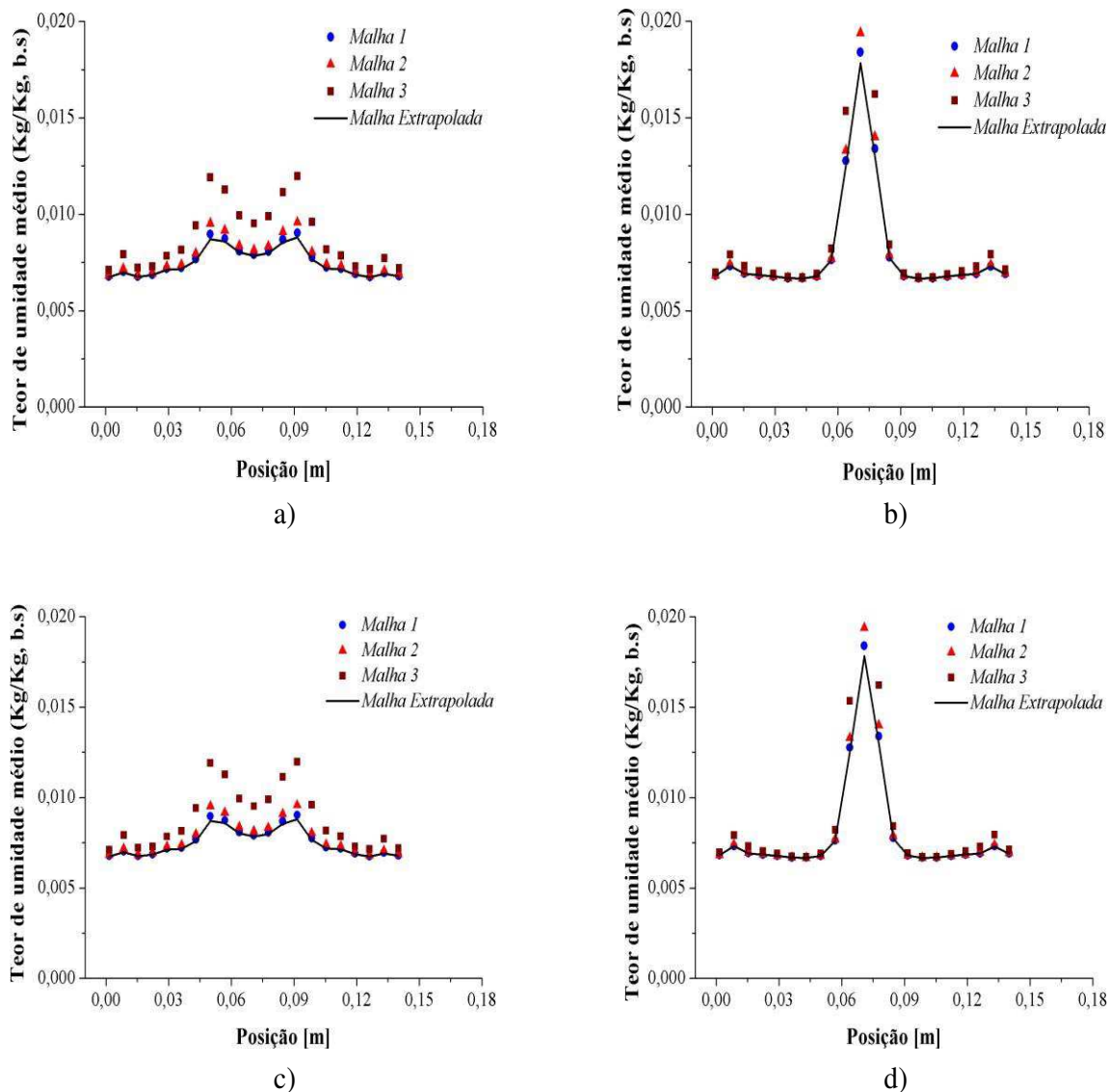
refinar as malhas, a solução tende a se aproximar do valor assintótico da solução extrapolada. Isto significa que as malhas não interferem na obtenção dos resultados. Entretanto a malha escolhida para a realização das simulações do presente trabalho foi a M2, a escolha foi devido a pequena discrepância nos valores da temperatura e teor de umidade e por apresentar um menor esforço e tempo computacional em relação a malha M1.

Figura 4.3 Perfil de temperatura no tijolo ao longo das linhas a) L1, b) L2, c) L3 e d) L4; para diferentes malhas numéricas.



Considerando a linha 1 para análise, na Tabela 4.2 estão explicitados os resultados da temperatura média do tijolo e outros parâmetros de convergência das malhas nos tempos de 10, 20, 30, 40 50 e 60 min. Vale ressaltar que, a escolha desses intervalos de tempo iniciais dar-se-á pelo fato de se observar que as maiores variações dessa variável se dá justamente nos tempos

Figura 4.4 Perfil do teor de umidade no tijolo, ao longo das linhas a) L1, b) L2, c) L3 e d) L4; para diferentes malhas numéricas.



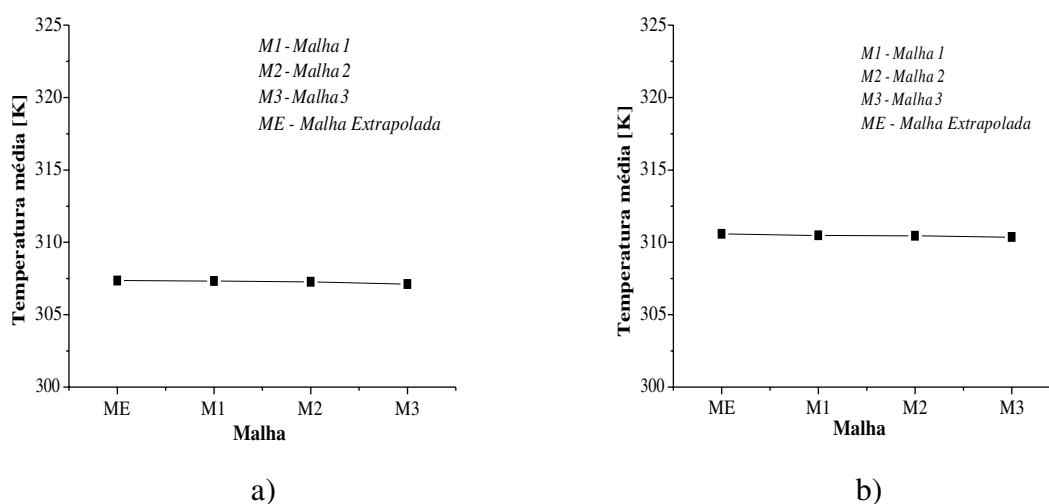
iniciais do processo. Verifica-se que o valor de C na tabela indica monotonicidade da convergência da solução, visto que seu valor estar entre 0 e 1. Também é possível afirmar que a solução extrapolada está próxima da solução exata para esta variável, devido à proximidade dos valores de ICM_{32} e $r^{p}ICM_{21}$. Pode-se observar também uma redução na condição de convergência, visto que $ICM_{21} < ICM_{32}$, e que os valores de ICM_{21} e ICM_{32} estão dentro do limite de 10% conforme relatado por Karatekin (1997), o que indica que a dependência dos resultados com o tamanho dos elementos da malha foi reduzido e se aproxima de uma solução independente da malha.

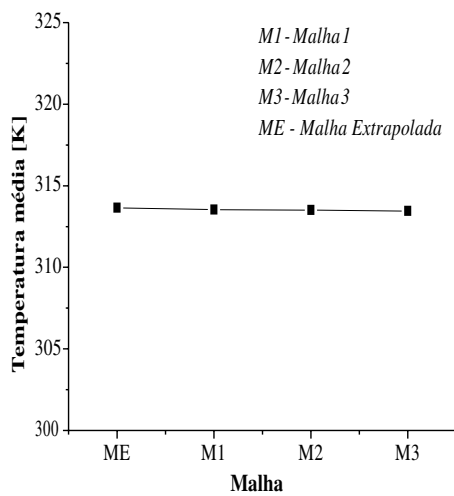
Tabela 4.2 Parâmetros da convergência de malha para a variável temperatura média.

t (min)	T[K]			p	ϕ_{ext}^{21}	ICM ₂₁	ICM ₃₂	C	r ^p ICM ₂₁
	M1	M2	M3						
10	307,33	307,28	307,11	3,20795	307,3607	0,01249	0,02	0,29	0,03
20	310,49	310,45	310,37	1,21758	310,5802	0,03635	0,04	0,5	0,05
30	313,54	313,51	313,45	0,88396	313,6503	0,04284	0,05	0,55	0,06
40	316,38	316,35	316,29	1,21758	316,4477	0,02675	0,03	0,50	0,04
50	319,01	318,98	318,92	1,21758	319,0777	0,02653	0,03	0,50	0,04
60	321,45	321,42	321,36	1,37602	321,5048	0,02178	0,02	0,48	0,03

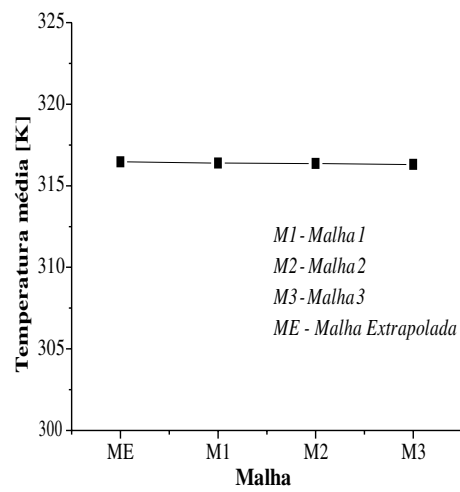
Na Figura 4.5 estão ilustrados os resultados obtidos da temperatura média do tijolo obtidos com as malhas M1, M2 e M3 em comparação com a solução extrapolada, nos instantes de tempo mencionados na Tabela 4.2. Estes resultados indicam que, ao se refinar as malhas, a solução obtida se aproxima do valor assintótico da solução extrapolada, sendo a solução da malha M1 a que mais se aproximou. A solução extrapolada representa uma estimativa da solução exata da variável em estudo.

Figura 4.5 Temperatura média do tijolo para diferentes tamanhos de malhas e tempos de processo.
a) t = 10 min, b) t = 20 min, c) t=30 min, d) t = 40 min, e) t = 50 min e f) t = 60 min.

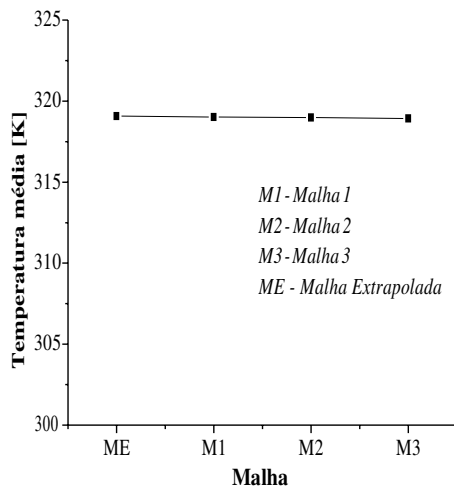




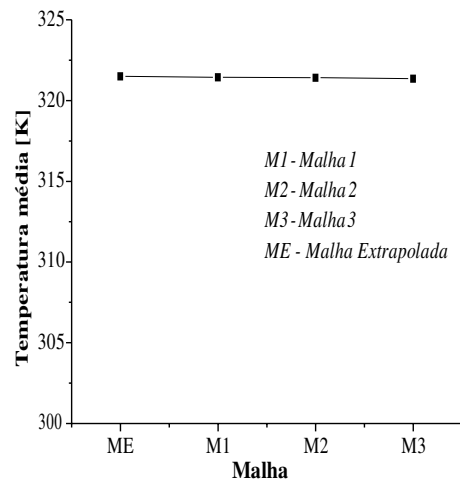
c)



d)



e)



f)

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos com o estudo de convergência de malha para a variável teor de umidade médio nos instantes indicados, pode-se observar que o valor de C também se encontra entre 0 e 1. Sendo assim, pode-se afirmar que esta variável converge de forma monotônica. Comparando os valores de $r^p ICM_{21}$ e ICM_{32} , percebe-se que os mesmos não estão próximos, levando a afirmar que a solução extrapolada não está tão próxima da solução exata. Pode-se observar, também que os valores de ICM_{21} e ICM_{32} , no tempo de 10 min, não se encontram dentro do intervalo assintótico dos 10%, conforme indicado por Karatekin (1997). Isso pode ser explicado devido aos altos gradientes de teor de umidade que ocorrem no início da secagem. Verifica-se, ainda, uma diminuição do valor do ICM_{21} em comparação ao ICM_{32} , o que indica que a solução se aproxima da solução exata independente da malha para esta variável, assim como foi observado para variável temperatura.

Tabela 4.3 Parâmetros de convergência de malha para a variável teor de umidade médio.

t (min)	M (Kg/Kg, b.s)			p	ϕ_{ext}^{21}	ICM ₂₁	ICM ₃₂	C	r ^p ICM ₂₁
	M1	M2	M3						
10	0,1427	0,1472	0,1557	0,9067	0,7403	12,8511	13,5305	0,54	16,887
20	0,1258	0,1309	0,1420	1,5775	0,6787	8,3232	9,7324	0,45	13,386
30	0,1138	0,1186	0,1306	2,0699	0,6250	6,1283	7,7473	0,40	11,4318
40	0,1043	0,1087	0,1208	2,4860	0,5796	4,6985	6,3460	0,36	9,9347
50	0,0969	0,1003	0,1122	2,8296	0,5393	3,7783	5,3874	0,32	8,8602
60	0,0895	0,0930	0,1046	3,1013	0,5028	3,1941	4,7514	0,30	8,130

Embora o *ICM* não tenha atendido o intervalo estabelecido dos 10% no instante de 10 minutos, todavia o perfil do teor de umidade representado na Figura 4.6 apresenta uma boa concordância com os dados experimentais reportados por Silva (2018), ao se utilizar a malha M1 na simulação.

A Figura 4.7 apresenta uma comparação do teor de umidade médio obtido com as malhas em comparação ao valor assintótico da solução extrapolada, nos instantes mencionados na Tabela 4.3. É possível observar um comportamento semelhante ao que foi observado para a variável temperatura, onde a malha que mais se aproxima do valor assintótico é a malha M1, que é a mais refinada.

Figura 4.6 Teor de umidade médio adimensional do tijolo em função do tempo para uma secagem a 80°C.

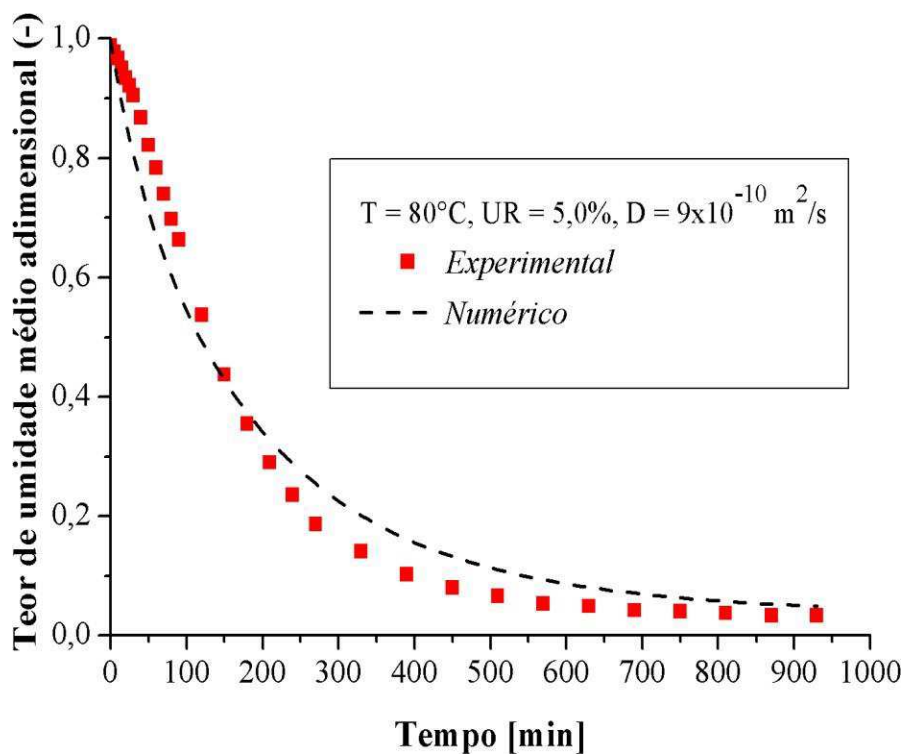
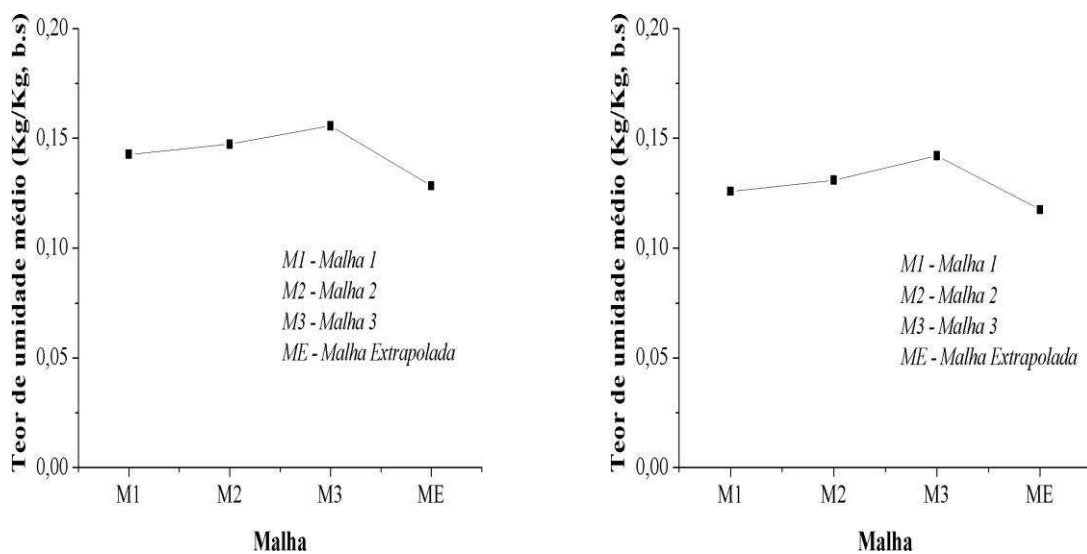
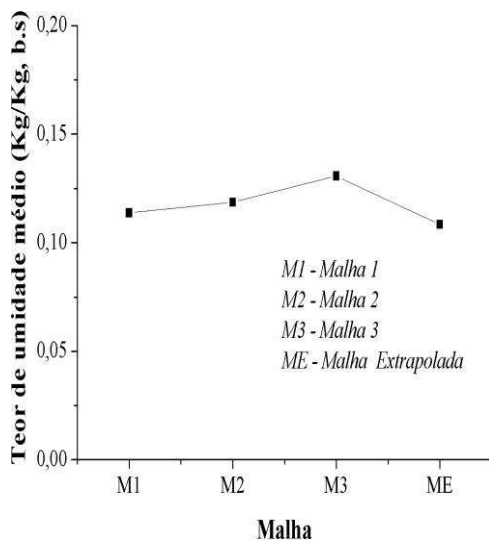


Figura 4.7 Teor de umidade médio do tijolo para diferentes tamanhos de malhas e tempos de processo. a) 10 min, b) 20 min, c) 30 min, d) 40 min, e) 50 min e f) 60 min.

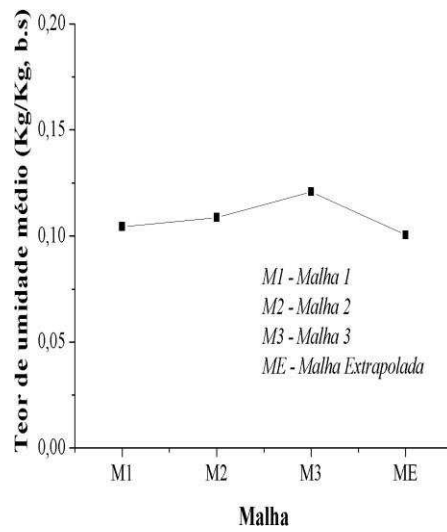


a)

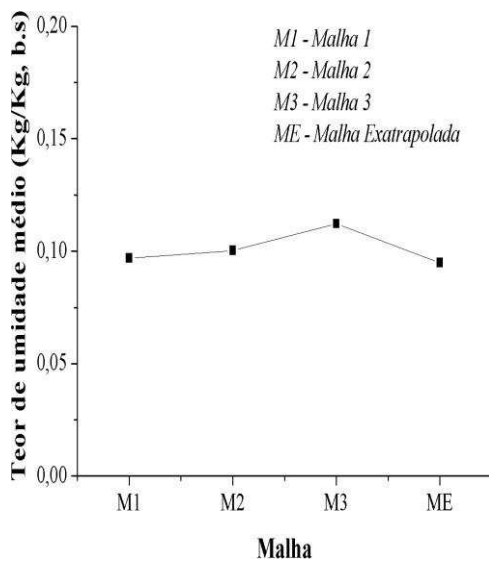
b)



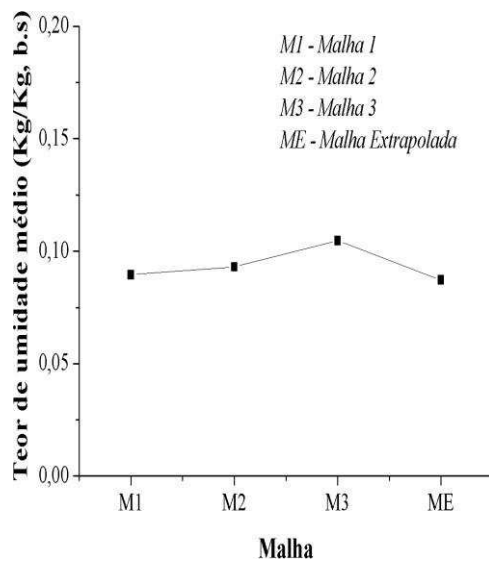
c)



d)



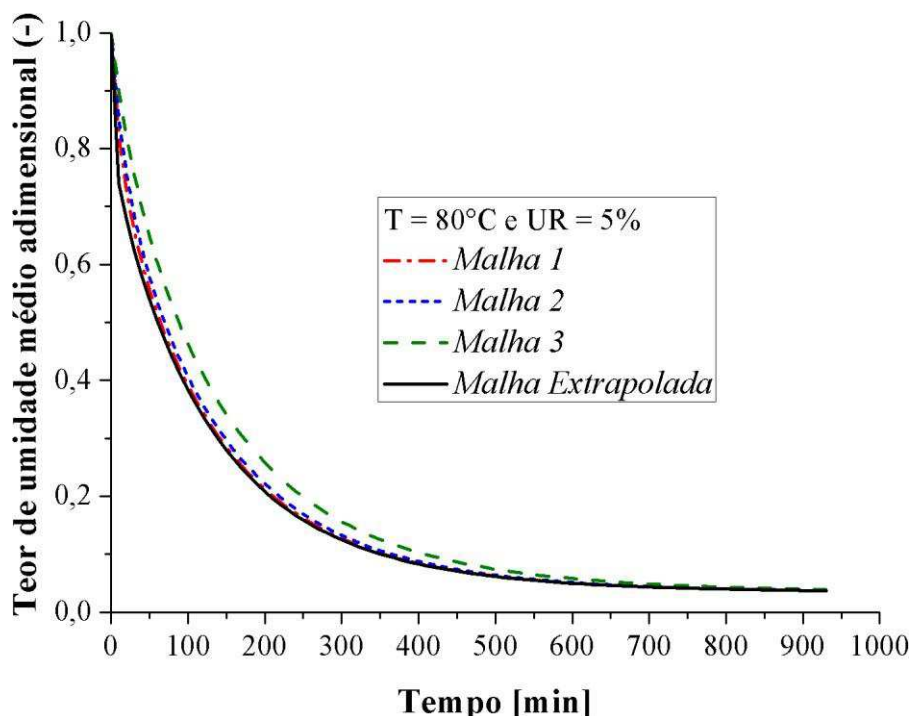
e)



f)

A Figura 4.8 apresenta a evolução do teor de umidade médio adimensional em função do tempo para as malhas M1, M2 e M3 em comparação com o resultado obtido com a extrapolação, usando a Equação 3.38. É possível observar uma boa aproximação entre os diferentes resultados.

Figura 4.8 Teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem para as malhas M1, M2, M3 e extrapolada.



As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os resultados do teor de umidade médio adimensional obtidos com as malhas M1 e M2, respectivamente, em função do tempo de secagem, com os ICM_{21} e ICM_{32} plotados em forma de barras de erro. O valor da ordem aparente p calculado para cada ponto variou entre 0,907 e 6,67, e a mesma apresentou uma média global de 4,72. Pode-se observar uma convergência monotônica em todos os pontos calculados, visto que estes valores se encontram no intervalo de 0 a 1.

Analisando a Figura 4.9 verifica-se um valor médio do ICM_{21} de 1,65%, com um valor máximo de 2,53% no instante final do processo, enquanto na Figura 4.10 verifica-se um ICM_{32} médio de 3,19% com um valor máximo de 4,44% no mesmo instante de tempo. Fazendo uma comparação entre os gráficos presentes nas Figuras 4.9 e 4.10 observa-se uma redução nos valores do ICM_{21} em comparação ao ICM_{32} em 97% dos pontos. Já o ICM_{21} foi maior do que ICM_{32} em apenas 3% dos pontos apresentados no gráfico, o que indica maior independência dos resultados em relação a malha para a variável teor de umidade ao longo do tempo. Portanto, pode-se afirmar que as malhas M1 e M2 apresentaram soluções totalmente independente da malha, visto que as duas malhas apresentaram ICM dentro do intervalo assintótico de 10%, conforme limite determinado em estudo realizado por Karatekin (1997).

Figura 4.9 Teor de umidade médio adimensional ao longo do tempo de processo para a malha M1 com ICM₂₁ em forma de barras de erro (T = 80°C e UR = 5%).

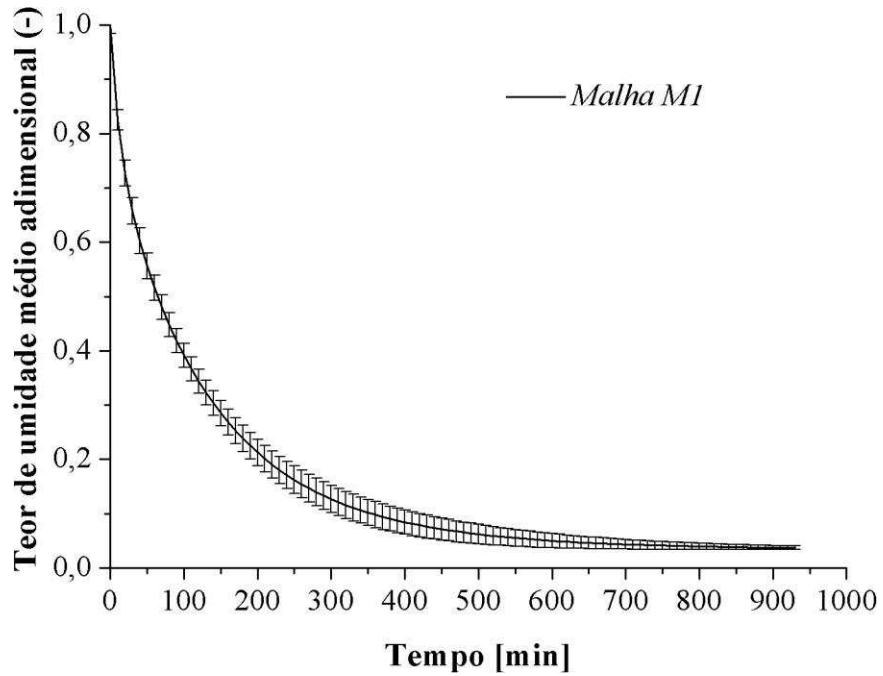
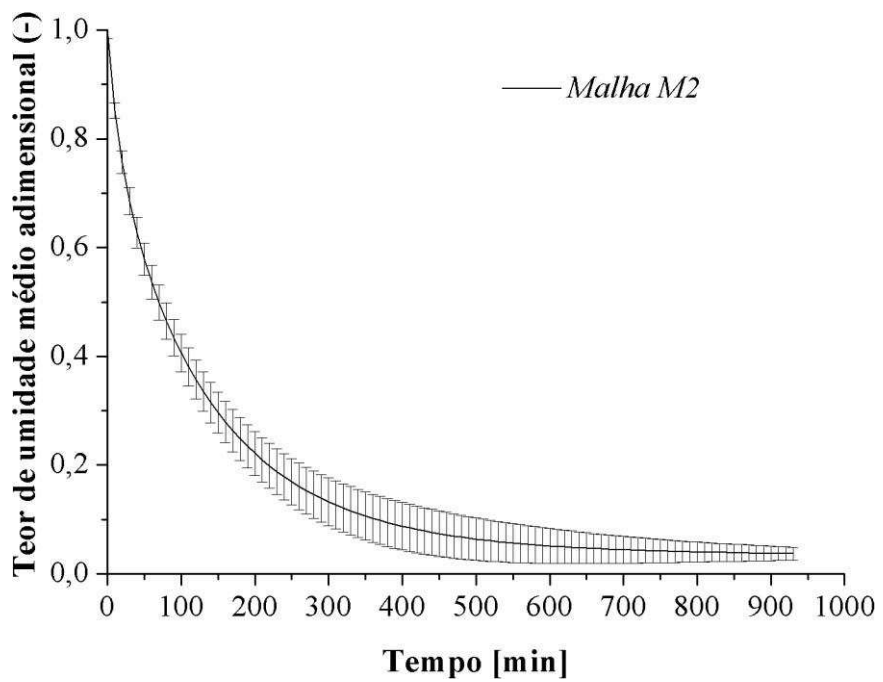


Figura 4.10 Teor de umidade médio adimensional ao longo do tempo de processo para a malha M2 com ICM₃₂ em forma de barras de erro (T = 80°C e UR = 5%).



4.1.2 O tijolo compensador em estufa

O estudo de dependência de malha para o caso tijolo na presença da estufa foi realizado de maneira análoga ao primeiro caso. Os dados apresentados na Tabela 4.4 foram obtidos com base no estudo mencionado na seção 3.6. Inicialmente, discretizou-se a malha de forma uniforme (ver Apêndice A), obtendo-se assim o número de elementos apresentados na Tabela 4.4. Para o estudo foram indicadas as malhas pelas seguintes nomenclaturas M1, M2 e M3, onde M1 é a malha mais refinada, M2 é a malha intermediária e M3 é a malha grosseira.

Tabela 4.4 Malha numérica avaliada.

Malha	Número de elementos	Número de nós	$\gamma^{(*)}$	Tempo de simulação
M1	719.055	785.968	$5,93075 \times 10^{-3}$	3 dias 10 h 53 min 11,024 s
M2	202.566	231.108	$9,04708 \times 10^{-3}$	1 dia 12 h 19 min 53,433 s
M3	18.981	24.936	$1,99185 \times 10^{-2}$	7 h 27 min 18,951 s

(*) Onde γ corresponde ao tamanho representativo da malha.

A Figura 4.11 refere-se à representação de uma das malhas utilizadas e detalhes das malhas M1, M2 e M3, do tijolo em estufa. O refinamento da malha foi realizado de maneira uniforme, maiores detalhes podem ser vistos no Apêndice A.

De maneira análoga ao caso tijolo sem estufa, para realizar o estudo de dependência de malha foram consideradas como condições de simulação, quatro linhas distribuídas ao longo do tijolo (Figura 4.12), em que suas coordenadas foram tomadas como sendo os mesmos valores do caso tijolo sem estufa. Sobre estas curvas foram representados os valores da temperatura e teor de umidade do tijolo no tempo de 15,5 h, obtidos com as simulações nas três malhas em comparação com a solução extrapolada representadas. Os resultados estão plotados nas Figuras 4.13 e 4.14. Estes resultados indicam que, ao se refinar as malhas, as soluções se aproximam do valor assintótico da solução extrapolada. Isto significa que as malhas não interferem nos resultados obtidos. Entretanto, a malha escolhida para a realização das simulações do presente trabalho foi a M2. A escolha foi devido a pequena discrepância entre os valores do teor de umidade e temperatura do tijolo na secagem e por apresentar um menor esforço computacional.

Figura 4.11 Representação da malha computacional do tijolo em estufa (a) e detalhes das malhas M1 (b), M2 (c) e M3 (d).

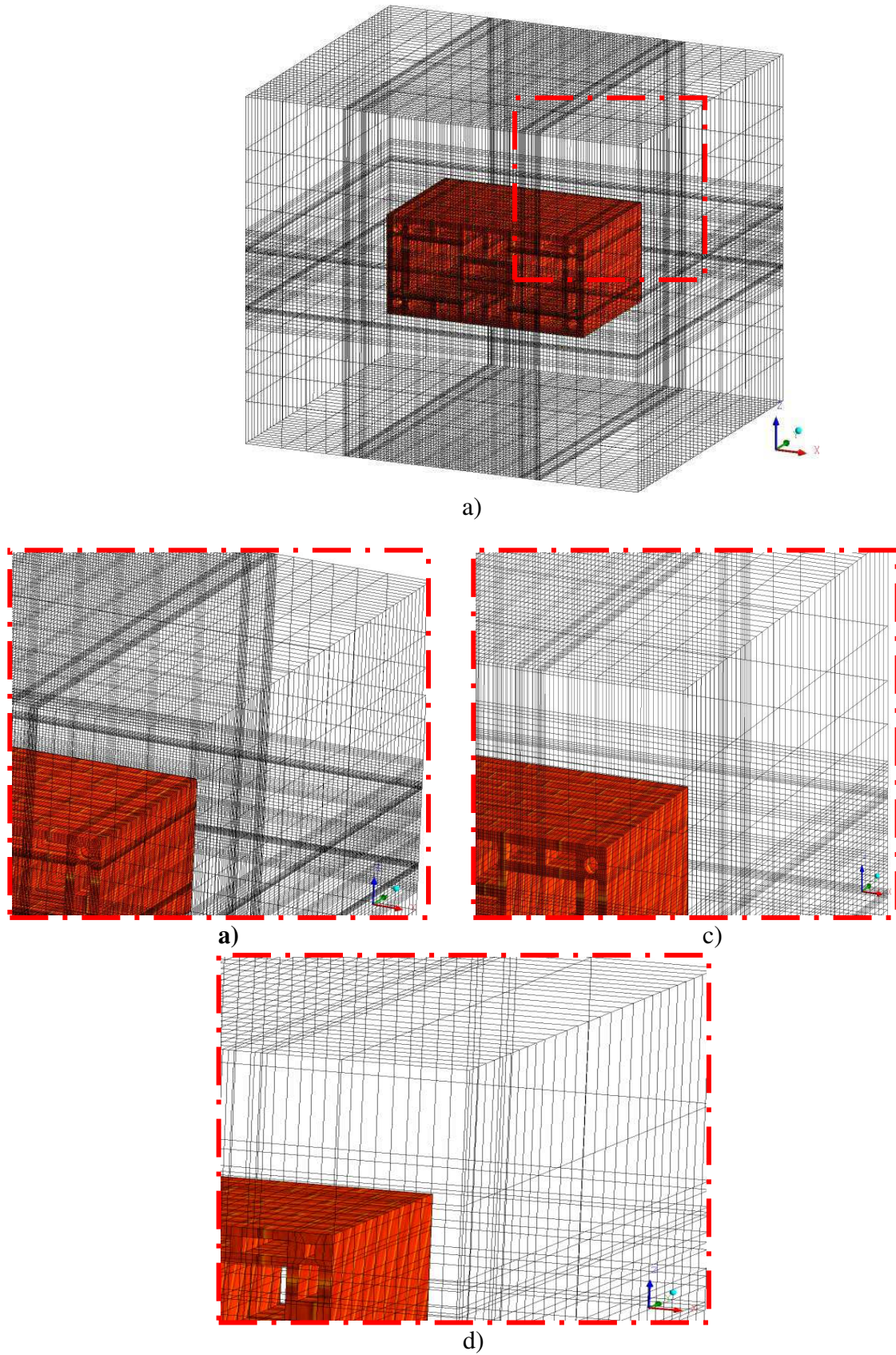


Figura 4.12 Linhas de análise ao longo do tijolo em estufa, usados no estudo de refino de malha.

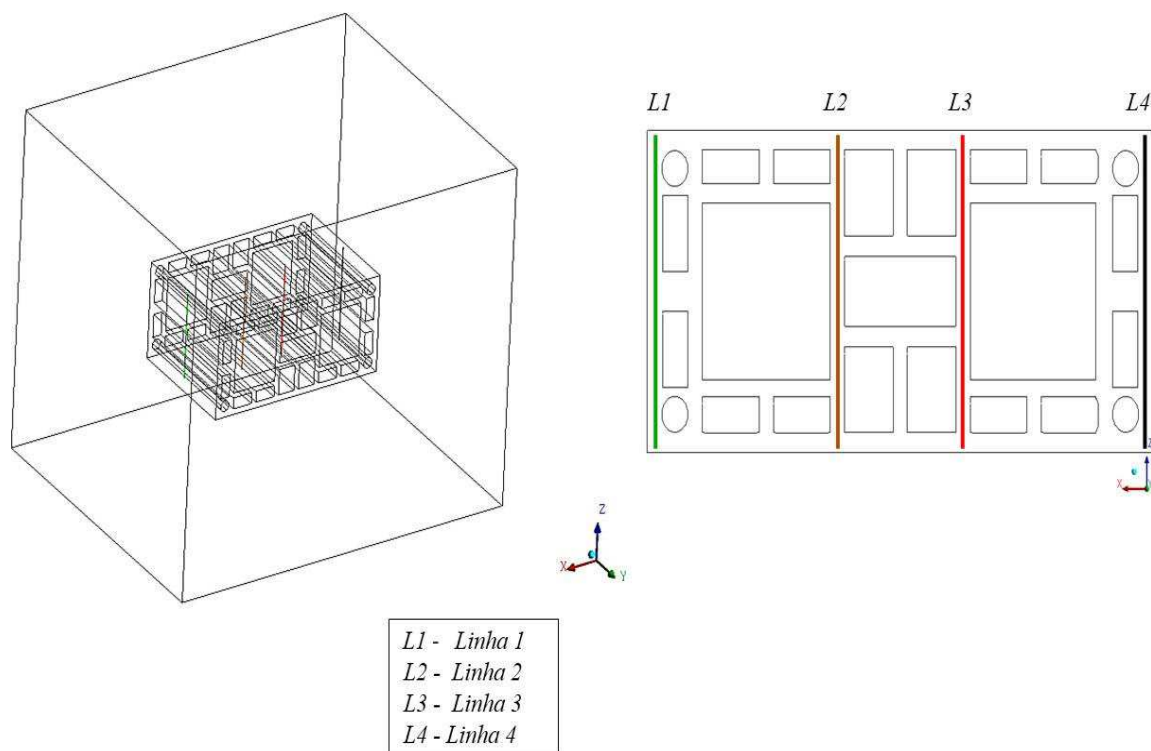
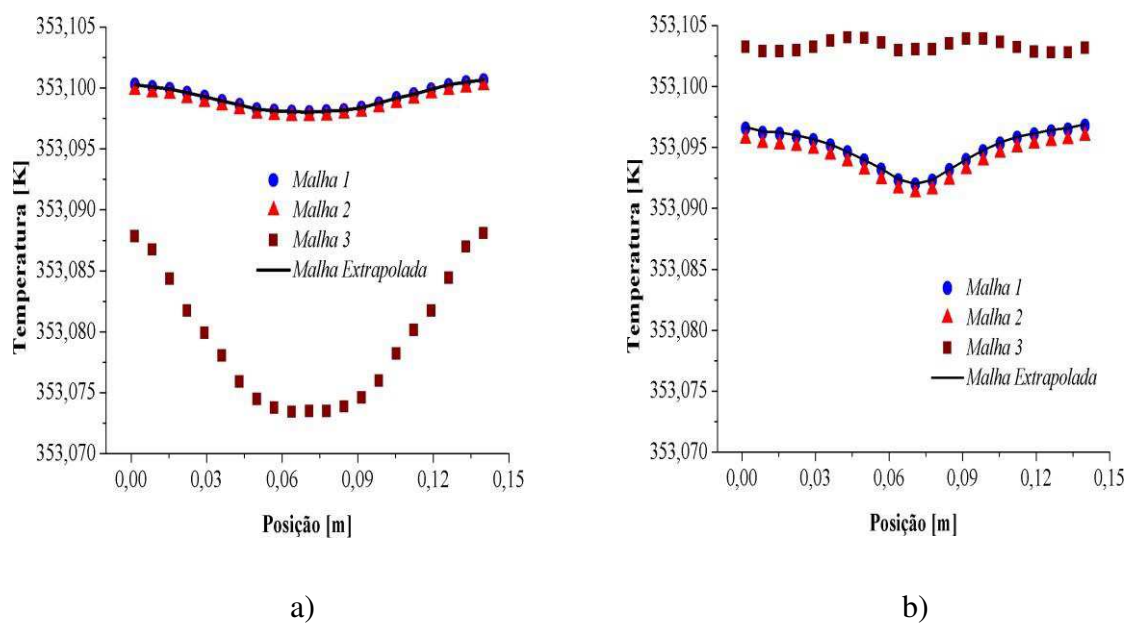
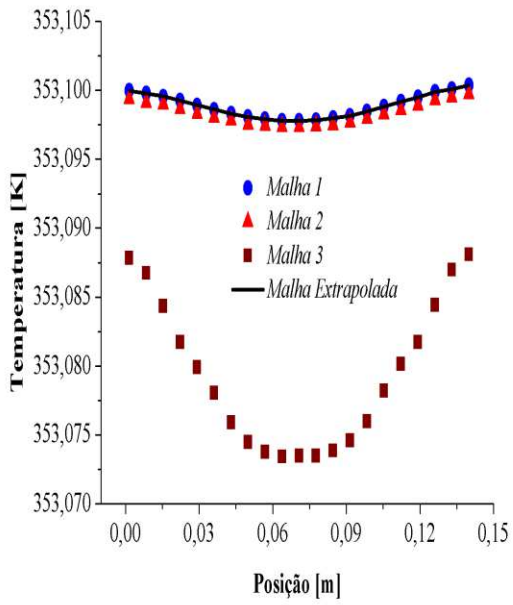
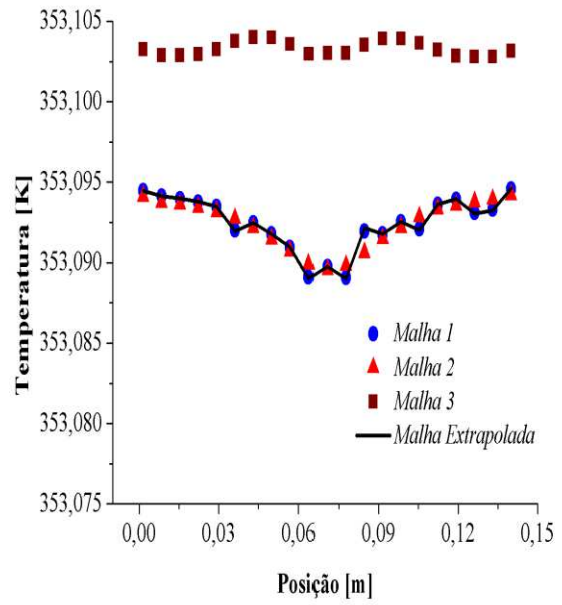


Figura 4.13 Perfil da temperatura no tijolo em estufa ao longo das linhas a) L1, b) L2, c) L3 e d) L4, para diferentes malhas numéricas.



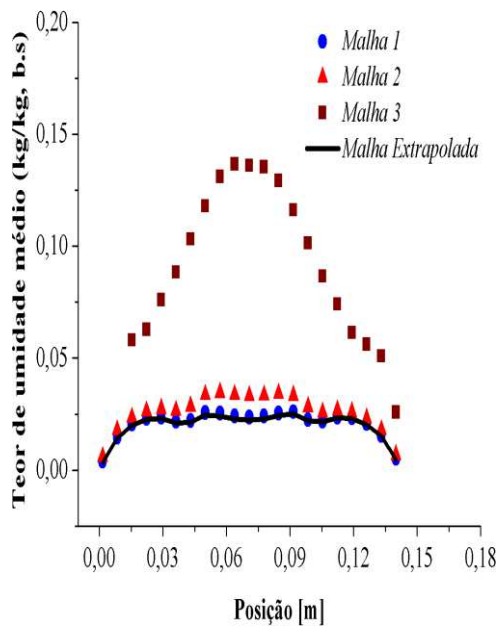


c)

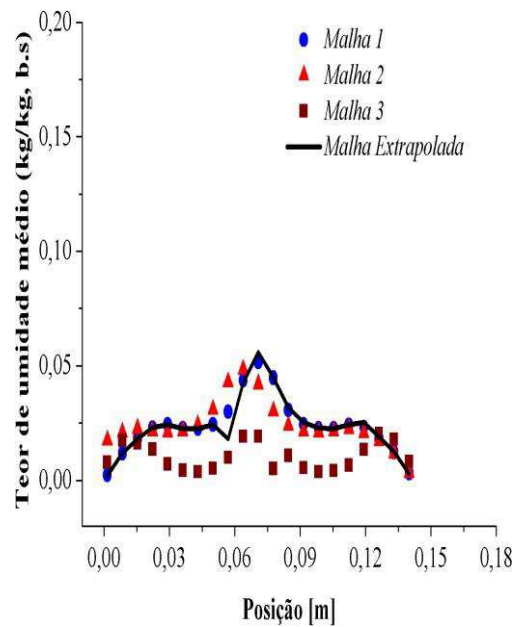


d)

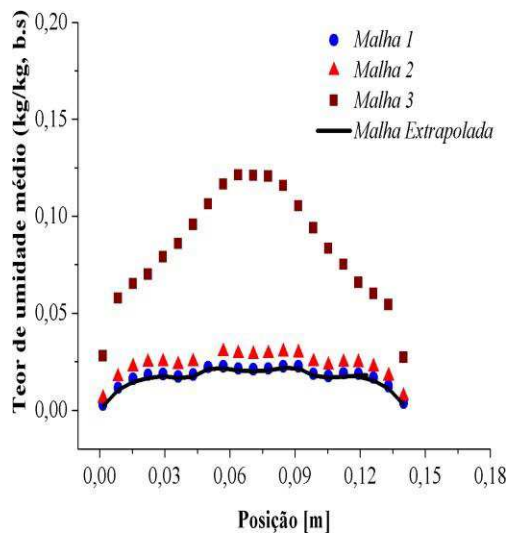
Figura 4.14 Perfil do teor de umidade médio do tijolo em estufa, ao longo das linhas a) L1, b) L2, c) L3 e d) L4, para diferentes malhas numéricas.



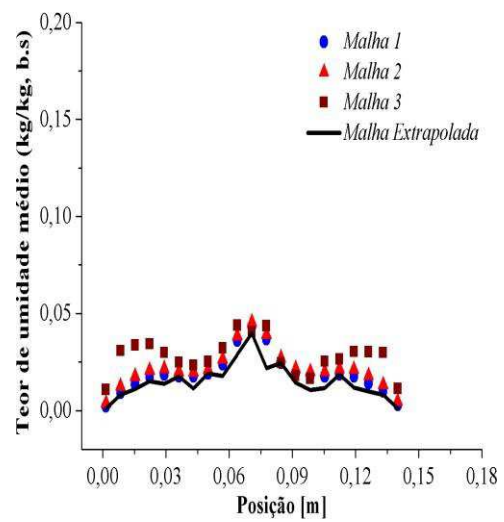
a)



b)



c)



d)

Considerando a linha 1 para análise, na Tabela 4.5 apresenta-se os resultados da temperatura média e outros parâmetros de convergência das malhas nos tempos de 10, 20, 30, 40 50 e 60 min. Vale ressaltar que, a escolha desses intervalos de tempo iniciais, como já mencionado no caso anterior, ocorrem pelo fato de se observar que as variações dessa variável se dá justamente nos tempos iniciais do processo.

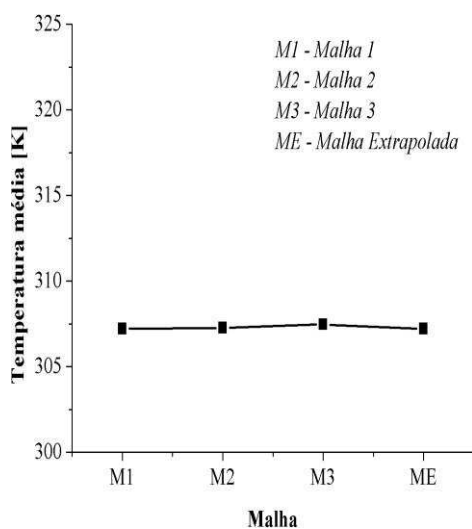
Verifica-se que o valor de C na Tabela 4.5 indica convergência oscilatória da solução para os instantes de 20 a 60 minutos, visto que seu valor é menor que zero e, para o instante de 10 minutos ocorre monotonicidade da convergência, pois o valor de C está entre 0 e 1. Fazendo uma análise comparativa entre os valores de $r^p ICM_{21}$ e ICM_{32} , percebe-se que os valores não estão próximos. No que acarreta, que a solução extrapolada não está tão próxima da solução exata. Pode-se observar também uma redução na condição de convergência, visto que $ICM_{21} < ICM_{32}$, e que os valores de ICM_{21} e ICM_{32} estão dentro do limite de 10% conforme relatado por Karatekin (1997), indicando que a dependência dos resultados obtidos com o tamanho dos elementos da malha foi reduzido e se aproxima de uma solução independente da malha.

A Figura 4.15 ilustra os resultados da temperatura média do tijolo obtidos com as malhas M1, M2 e M3 em comparação com a solução extrapolada nos instantes mencionados na Tabela 4.5. Estes resultados, como já mencionado, indicam que, ao se refinar as malhas, a solução obtida se aproxima do valor assintótico da solução extrapolada, sendo a solução da malha M1 a que mais se aproximou. A solução extrapolada representa uma estimativa da solução exata da variável em estudo.

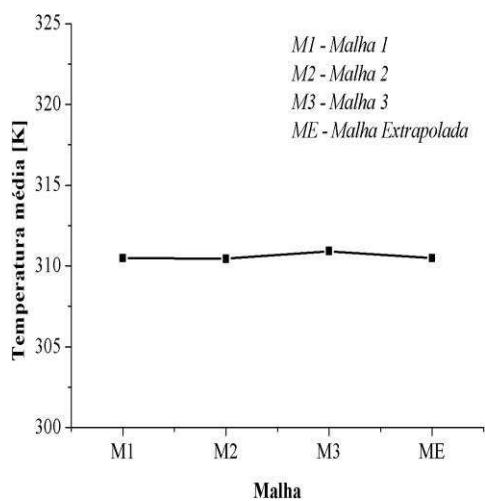
Tabela 4.5 Parâmetros da convergência de malha para a variável temperatura média.

t (min)	T [K]			p	ϕ_{ext}^{21}	ICM ₂₁	ICM ₃₂	C	r ^p ICM ₂₁
	M1	M2	M3						
10	307,22	307,26	307,47	2,9591	0,0718	0,6121	0,7758	0,21	2,136
20	310,49	310,45	310,92	5,7127	0,1382	0,0647	0,097	- 0,07	0,722
30	313,53	313,51	314,07	7,0603	0,1997	0,0170	0,0271	- 0,045	0,335
40	316,38	316,35	316,95	6,8	0,2572	0,0177	0,028	- 0,05	0,3123
50	319,01	318,98	319,60	6,89	0,3103	0,0141	0,0223	- 0,05	0,2582
60	321,45	321,42	322,05	6,6294	0,3596	0,0153	0,024	- 0,05	0,2512

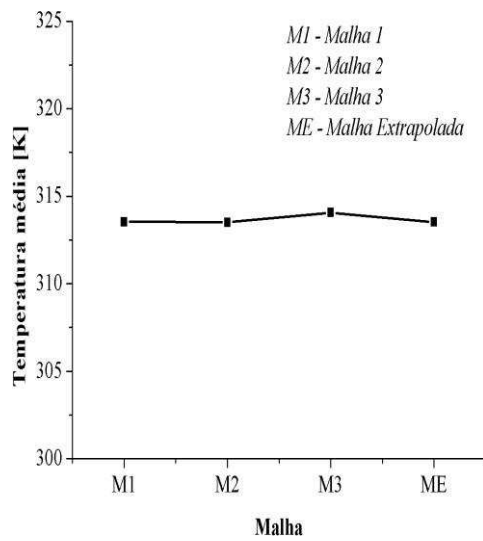
Figura 4.15 Temperatura média do tijolo em estufa para diferentes tamanhos de malhas e tempos de processo. a) 10 min, b) 20 min, c) 30 min, d) 40 min, e) 50 min e f) 60 min.



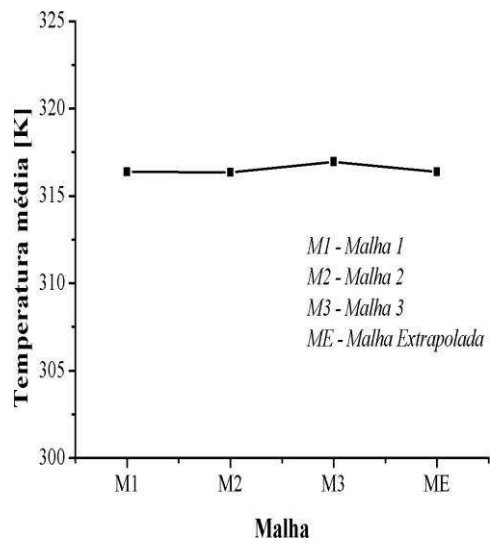
a)



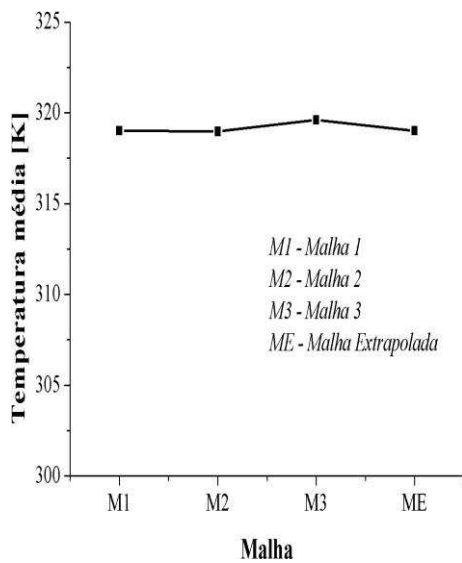
b)



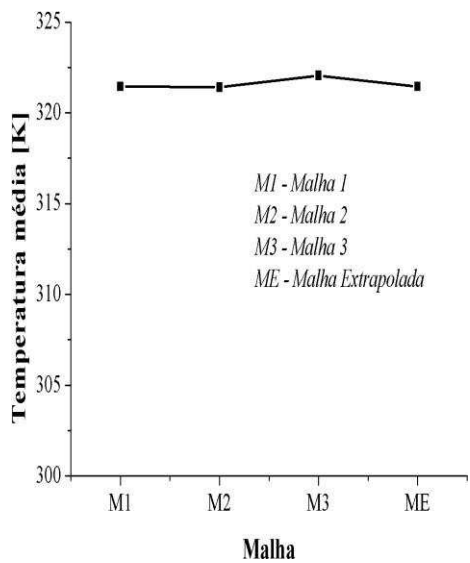
c)



d)



e)



f)

A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos com o estudo de convergência de malha para a variável teor de umidade médio nos instantes indicados.

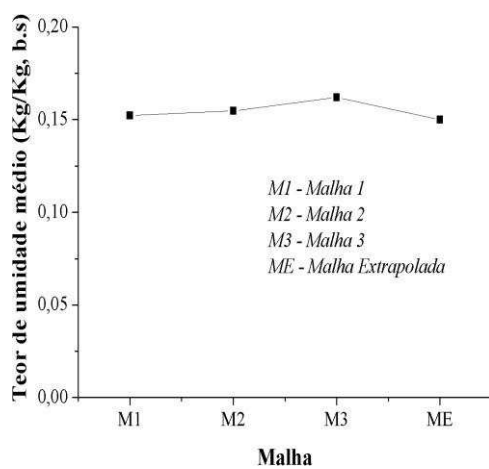
Tabela 4.6 Parâmetros de convergência de malha para a variável teor de umidade médio.

t (min)	M (Kg/Kg, b.s)			p	ϕ_{ext}^{21}	ICM ₂₁	ICM ₃₂	C	r ^p ICM ₂₁
	M1	M2	M3						
10	0,1522	0,1547	0,1619	1,9604	0,8699	1,5547	1,7821	0,30	3,5578
20	0,1392	0,1416	0,1538	3,0285	0,7992	0,8587	1,0885	0,20	3,0850
30	0,1286	0,1309	0,1455	3,7223	0,7400	0,5892	0,7859	0,16	2,8375
40	0,1196	0,1217	0,1379	4,1987	0,6882	0,4615	0,6342	0,13	2,7178
50	0,1116	0,1136	0,1309	4,5395	0,6422	0,3928	0,5501	0,12	2,8375
60	0,1044	0,1063	0,1244	4,7940	0,6007	0,3520	0,4995	0,10	2,6651

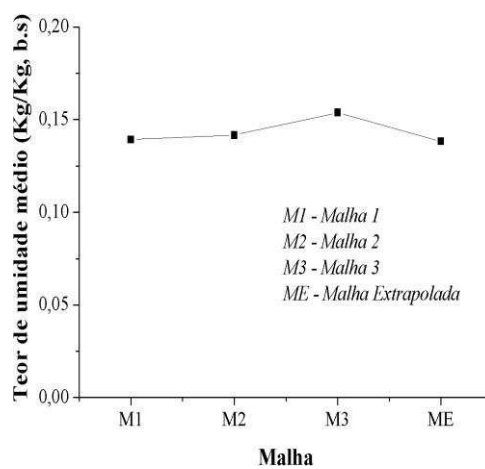
De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.6, pode-se observar que o valor de C se encontra entre 0 e 1. Sendo assim, pode-se afirmar que esta variável converge de forma monotônica. Comparando os valores de $r^p ICM_{21}$ e ICM_{32} , percebe-se que os valores não estão próximos, levando a afirmar que a solução extrapolada não está tão próxima da solução exata. Pode-se ainda observar que os valores de ICM_{21} e ICM_{32} , em todos instantes de tempo, se encontram dentro do intervalo assintótico dos 10%, conforme indicado por Karatekin (1997). Verifica-se, também, uma diminuição do valor do ICM_{21} para o ICM_{32} , o que indica que a solução se aproxima da solução exata independente da malha para esta variável, também observado para variável temperatura.

A Figura 4.16 apresenta uma comparação do teor de umidade médio adimensional obtido com cada malha em comparação ao valor assintótico da solução extrapolada, nos instantes mencionados na Tabela 4.6. É possível observar um comportamento semelhante ao que foi observado para a variável temperatura, onde a malha que mais se aproxima do valor assintótico é a malha M1, que é a mais refinada.

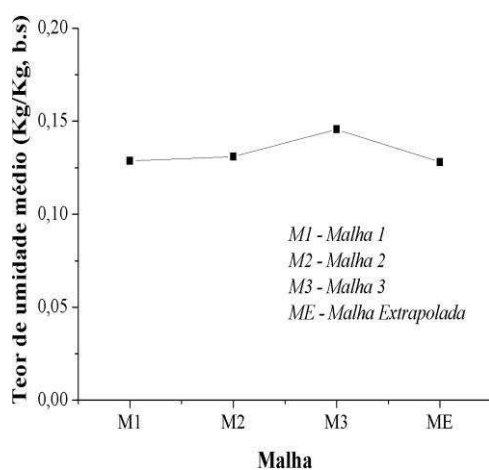
Figura 4.16 Teor de umidade médio do tijolo em estufa para diferentes tamanhos de malhas e tempos de processo. a) 10 min, b) 20 min, c) 30 min, d) 40 min, e) 50 min e f) 60 min.



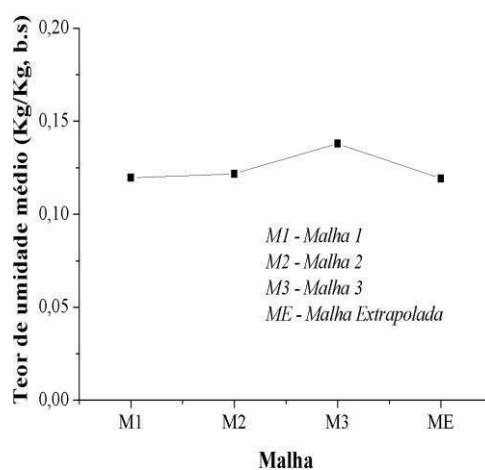
a)



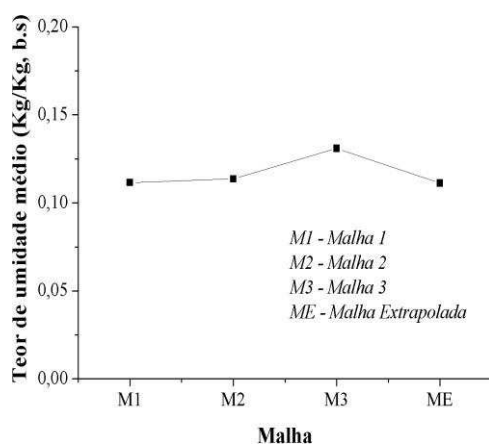
b)



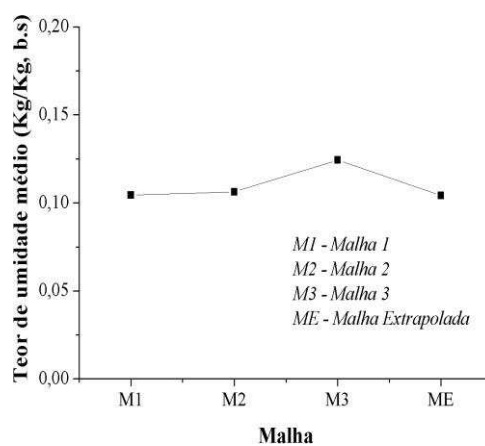
c)



d)



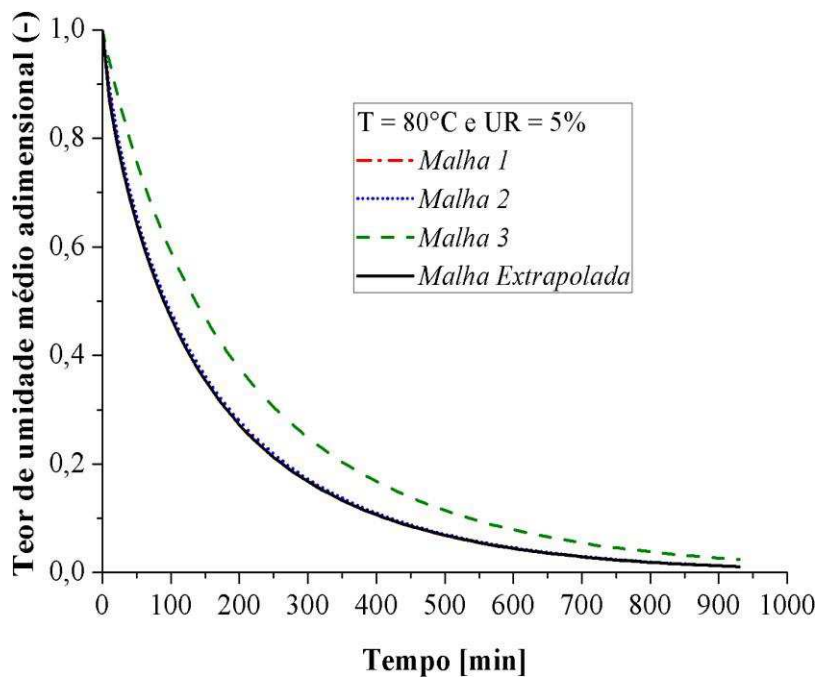
e)



f)

A Figura 4.17 apresenta a evolução dos resultados do teor de umidade médio adimensional em função do tempo para as malhas M1, M2 e M3 em comparação com o resultado obtido com a malha extrapolada, usando a Equação 3.38. Após análise dessa figura, é possível observar uma boa aproximação entre os diferentes resultados.

Figura 4.17 Teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem para as malhas M1, M2, M3 e extrapolada ($T = 80^{\circ}\text{C}$ e $UR = 5,0\%$).



As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados da variável teor de umidade médio adimensional obtidos com as malhas M1 e M2, respectivamente, em função do tempo de secagem, com os ICM_{21} e ICM_{32} plotados em forma de barras de erro. O valor da ordem aparente p calculado para cada ponto variou entre 1,96 e 8,94, e a mesma apresentou uma média global de 6,74. Podemos observar ainda uma convergência monotônica em todos os pontos calculados, visto que estes valores se encontram no intervalo de 0 a 1.

Analisando a Figura 4.18 verifica-se um valor médio do ICM_{21} de 0,30%, com um valor máximo de 1,62% no instante final do processo, enquanto que na Figura 4.19 verifica-se um ICM_{32} médio de 0,65% com um valor máximo de 1,62% no mesmo instante de tempo. Fazendo uma comparação entre os gráficos presentes nas Figuras 4.18 e 4.19 observar-se uma redução nos valores do ICM_{21} para o ICM_{32} em 94% dos pontos. Já o ICM_{21} foi maior do que ICM_{32} em apenas 6% dos pontos apresentados no gráfico, o que indica maior independência dos resultados

em relação a malha para a variável teor de umidade ao longo do tempo. Portanto, pode-se afirmar que as malhas M1 e M2 apresentaram soluções totalmente independente da malha, visto que as duas malhas apresentaram *ICM* dentro do intervalo assintótico de 10%, conforme limite determinado em estudo realizado por Karatekin (1997).

Figura 4.18 Teor de umidade médio adimensional para a malha M1 com ICM_{21} em forma de barras de erro ($T = 80^{\circ}C$ e $UR = 5,0\%$).

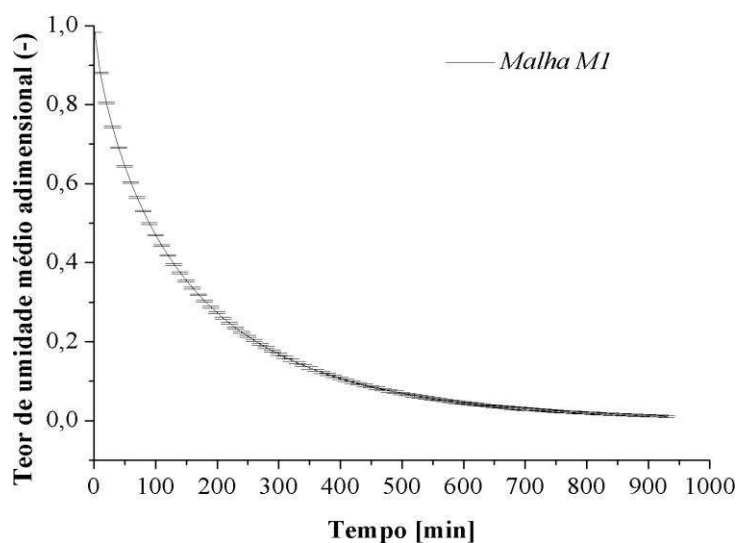
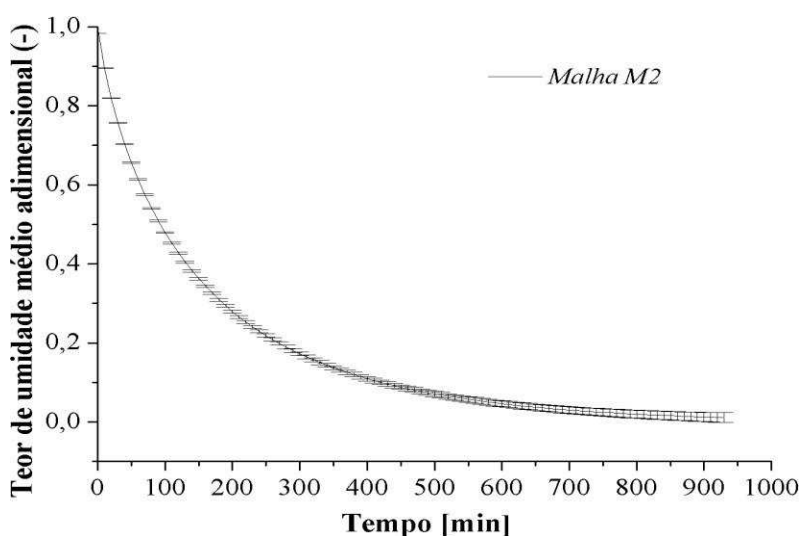


Figura 4.19 Teor de umidade médio adimensional para a malha M2 com ICM_{32} em forma de barras de erro ($T = 80^{\circ}C$ e $UR = 5,0\%$).



4.2 Casos estudados

4.2.1 Secagem do tijolo compensador isoladamente

4.2.1.1 Cinética de secagem e aquecimento

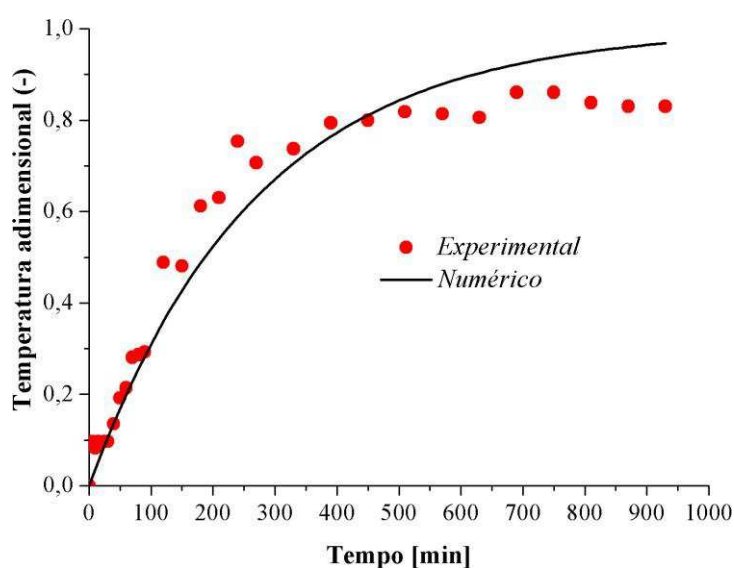
As Figuras 4.20 e 4.21 ilustram a evolução da temperatura adimensional na superfície do tijolo, dimensional e do teor de umidade médio ao longo do tempo de secagem, a temperatura de 80°C, respectivamente. Estas figuras indicam que os resultados numéricos da secagem do tijolo compensador 07 se ajustam adequadamente aos dados experimentais reportados por Silva (2018). Esta concordância dos resultados está mais evidenciada para o teor de umidade (Figura 4.21). As discrepâncias observadas para a temperatura, sobretudo para tempos superiores a 400 min, podem ser explicadas, de acordo com Silva (2018), porque as medições feitas no tijolo durante os experimentos foram realizadas fora da estufa, ocasionando perda de calor do tijolo e erros de mediação no valor de grandeza. Vale ressaltar, que este problema ocorre mais fortemente quando se tem temperaturas mais elevadas, ver Figura 4.24, pois ao se retirar a peça da estufa, a mesma já perde calor para o meio, fazendo com que o mesmo resfrie mais rapidamente. Já na Figura 4.21, verifica-se que, para os dados referente ao teor de umidade, há uma variação mais intensas nos primeiros 400 min e, após este período, tem-se uma variação praticamente constante (equilíbrio higroscópico).

Uma análise mais refinada da Figura 4.21 possibilita ver uma boa concordância entre os dados experimentais e numéricos nos instantes iniciais até cerca de 200 min. A partir deste instante, até 500 min, aproximadamente, percebe-se certa discrepância entre os resultados simulados e os dados experimentais, indicando que a difusividade mássica efetiva deveria ser variável e não constante como considerada nesta pesquisa, e por não ter levado em consideração o encolhimento do material, propriedade esta que pode ter um significativo efeito na difusividade de massa e, conseqüentemente na taxa de remoção da umidade.

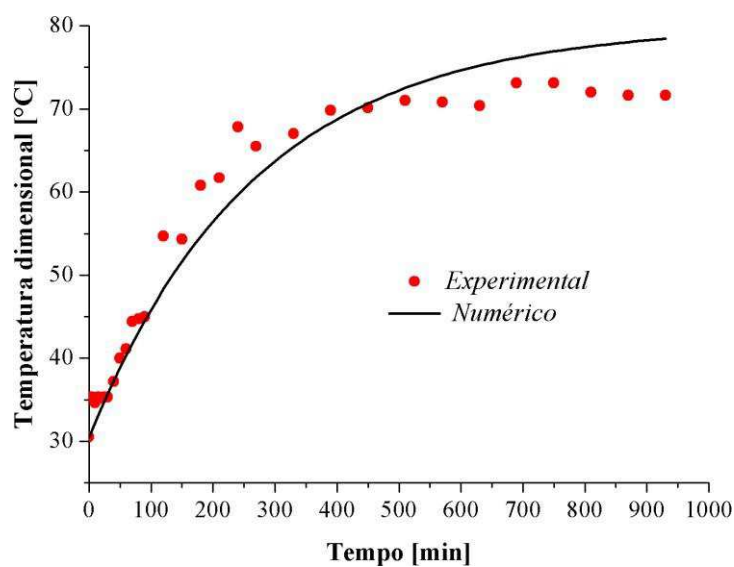
A partir de um estudo comparativo entre o valor previsto do teor médio de umidade e dos dados experimentais, obteve-se um erro mínimo quadrático de 0,000109 (kg/kg)², utilizando um coeficiente de difusão em massa de 9×10^{-10} m²/s, coeficiente este obtido a partir de ajuste de curvas, em que sua indicação foi tomada através do menor valor da variância e desvio padrão calculados (Apêndice B). Para a temperatura na superfície (vértices) do tijolo foi calculado um erro mínimo quadrático de 11,8 (°C)², quando usou-se um coeficiente de transferência de calor convectivo 1,0 W/m². K.

Foi realizada uma análise dos resultados obtidos a partir das medidas de dispersão, correlação e um teste estatístico a t Student disponíveis na literatura, com o objetivo de assegurar um bom ajuste da curva numérica com os experimentos. Percebeu-se que, após várias simulações numéricas, obteve-se um desvio padrão mínimo de $6,36 \times 10^{-1}$ e variância igual a $4,06 \times 10^{-1}$ para a temperatura e um desvio padrão de $1,93 \times 10^{-3}$ e variância igual a $3,74 \times 10^{-6}$ para o teor de umidade (ver Apêndice B).

Figura 4.20 Temperatura da superfície do tijolo em função do tempo de secagem ($T = 80^\circ\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$). a) Adimensional e b) dimensional.



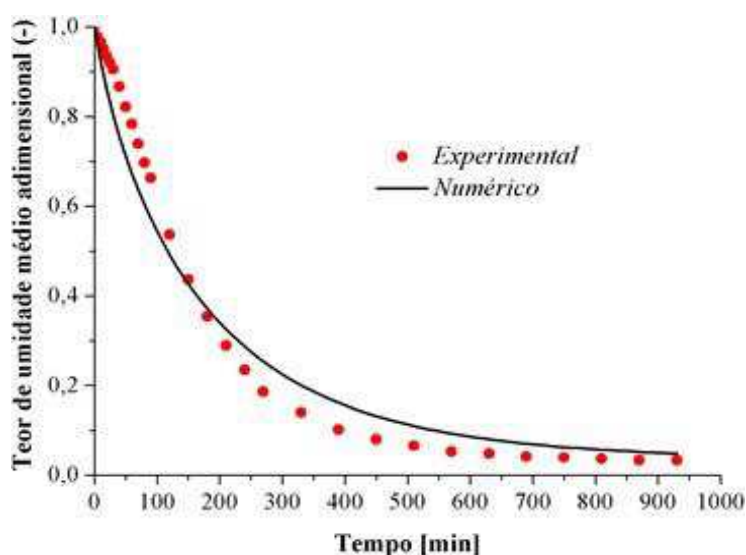
a)



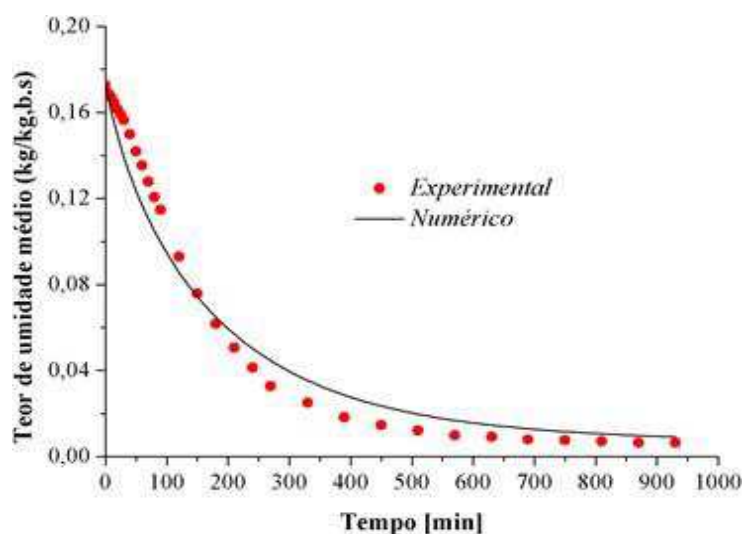
b)

Neste estudo, foi calculado a correlação de Pearson com intuito de observar qual o grau de correlação que havia entre os dados, obtendo um valor igual a 0,923 para temperatura e 0,993 para o teor de umidade, os quais indicam uma forte correlação. Por fim, fez um estudo com a distribuição t- Student, em que obteve-se um intervalo de confiança a partir dos dados experimentais ao nível de confiança de 95%. Percebeu-se que os resultados numéricos (Figura 4.22 e 4.23) obtidos indicam um comportamento plausível para os parâmetros temperatura e teor de umidade baseado nos dados experimentais, o que significa que os mesmos estão dentro da faixa de confiança.

Figura 4.21 Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$). a) Adimensional e b) dimensional.



a)



b)

As Figuras 4.24 e 4.25 ilustram de forma comparativa o estudo realizado com as diferentes temperaturas indicadas na Tabela 4.7. Toda análise foi realizada de maneira semelhante a temperatura de 80°C. Percebe-se que o aumento da temperatura de secagem influencia acentuadamente o processo de secagem, diminuindo o teor de umidade do tijolo mais rapidamente e, com isto, o tempo de secagem final. Tal fato ocorre devido ao aumento da disponibilidade de energia para a vaporização da água e da elevação do coeficiente de transferência de massa com o aumento da temperatura de secagem. Em todos os casos estudados, nota-se um bom ajuste entre os resultados numéricos e os dados experimentais. Em adição a isto, os resultados também mostram coerência com o fenômeno físico esperado para o transporte do calor e massa no interior do tijolo, nas situações analisadas.

A Tabela 4.7 apresenta os diferentes casos simulados, onde estão expostos, os valores do coeficiente de difusão efetivo (D) em função da temperatura para cada caso estudado.

Tabela 4.7 Estudo de casos.

Casos	Temperatura [°C]	Tijolo sem estufa	Tijolo em estufa
		D [m ² /s]	D [m ² /s]
01	50	6×10^{-10}	9×10^{-10}
02	60	7×10^{-10}	17×10^{-10}
03	70	8×10^{-10}	20×10^{-10}
04	80	9×10^{-10}	32×10^{-10}
05	90	10×10^{-10}	46×10^{-10}
06	100	12×10^{-10}	85×10^{-10}

Figura 4.22 Intervalo da t Student com 95% de confiança para a temperatura do tijolo em função do tempo de secagem (T = 80°C, UR 5%).

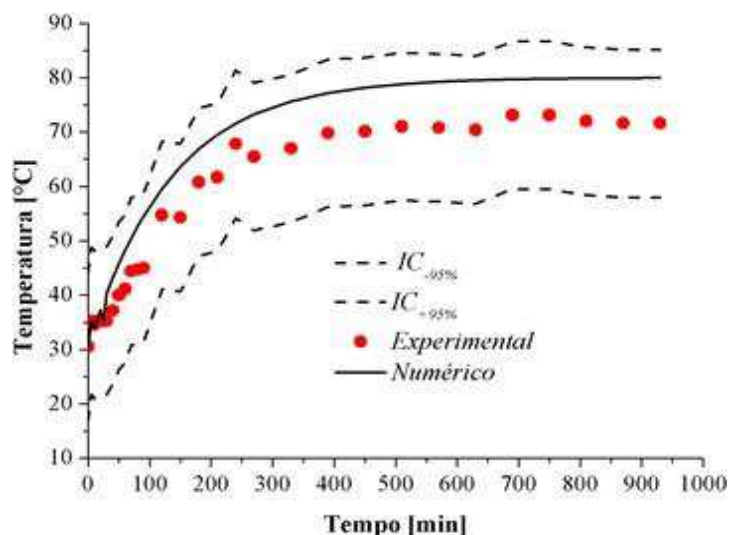


Figura 4.23 Intervalo da t Student com 95% de confiança para o teor de umidade do tijolo em função do tempo de secagem (T = 80°C, UR = 5%).

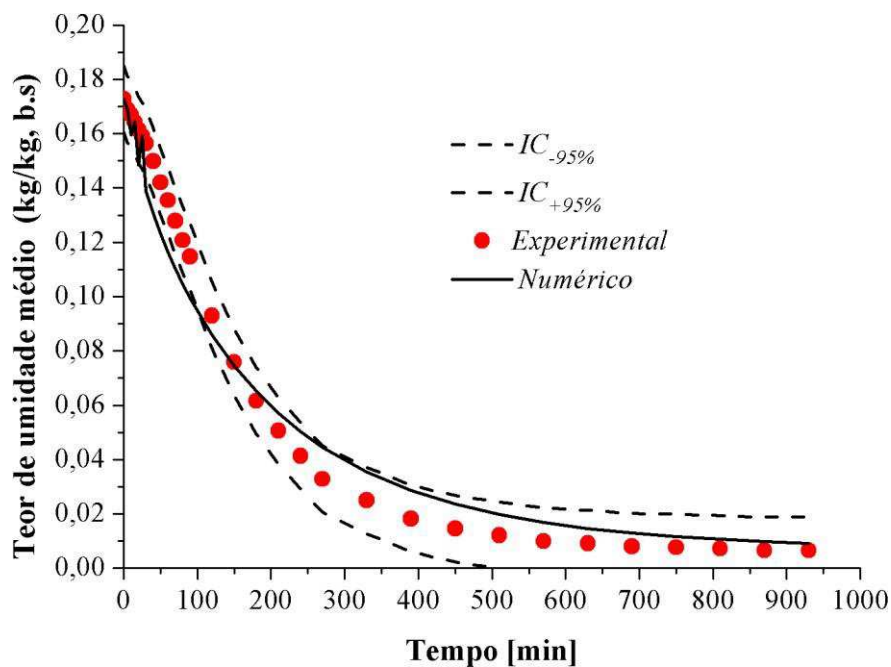
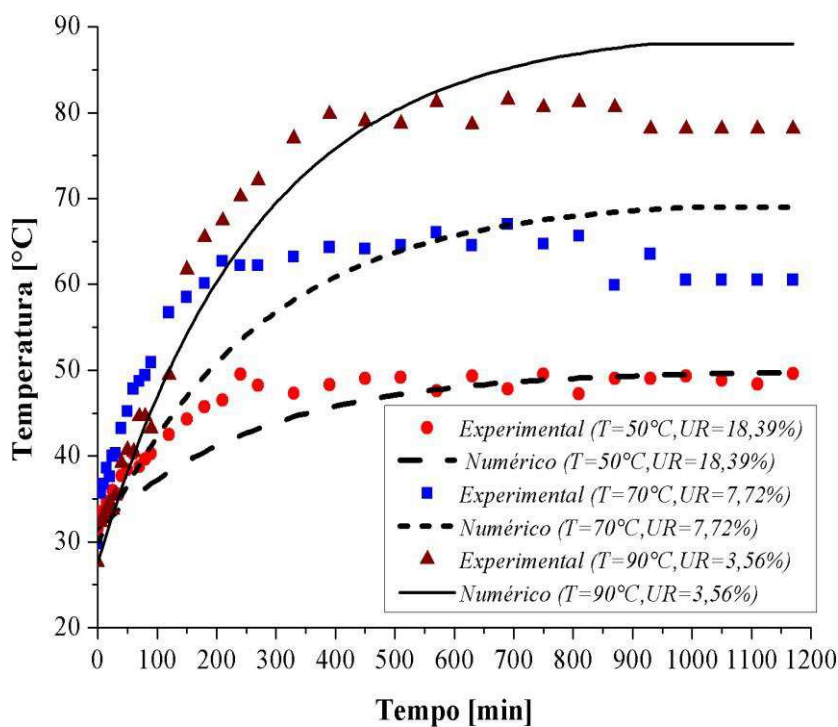
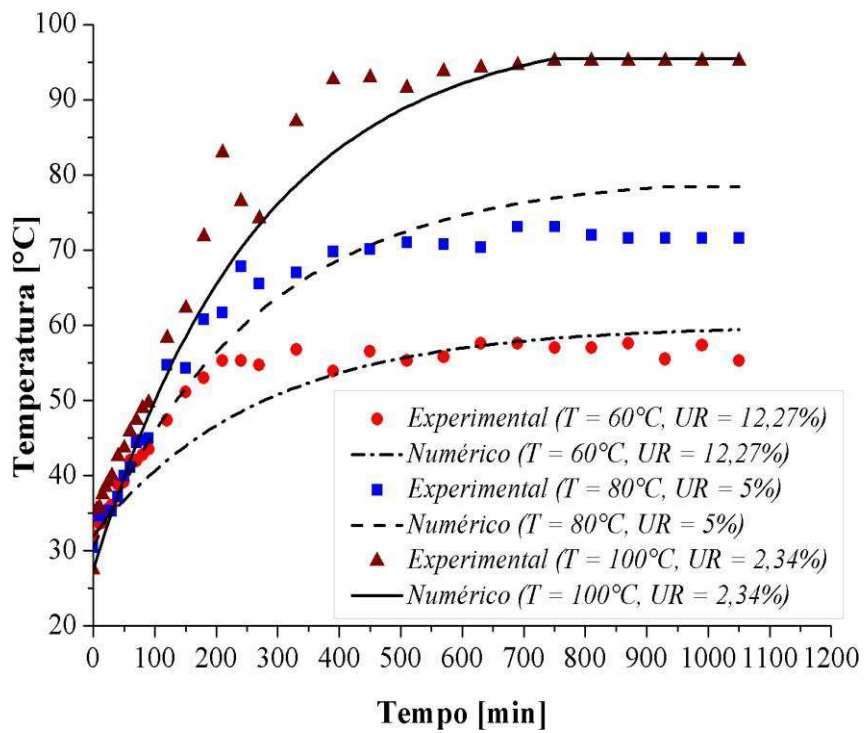


Figura 4.24 Temperaturas do tijolo em função do tempo no tijolo para diferentes condições de secagem. a) T = 50°C, 70°C e 90°C, e b) T = 60°C, 80°C e 100°C.

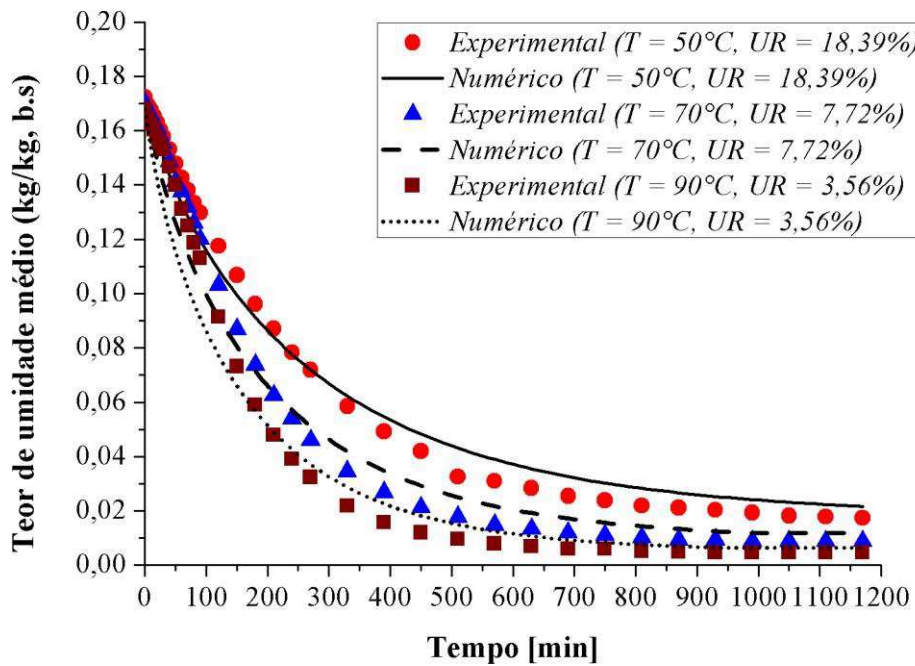


a)

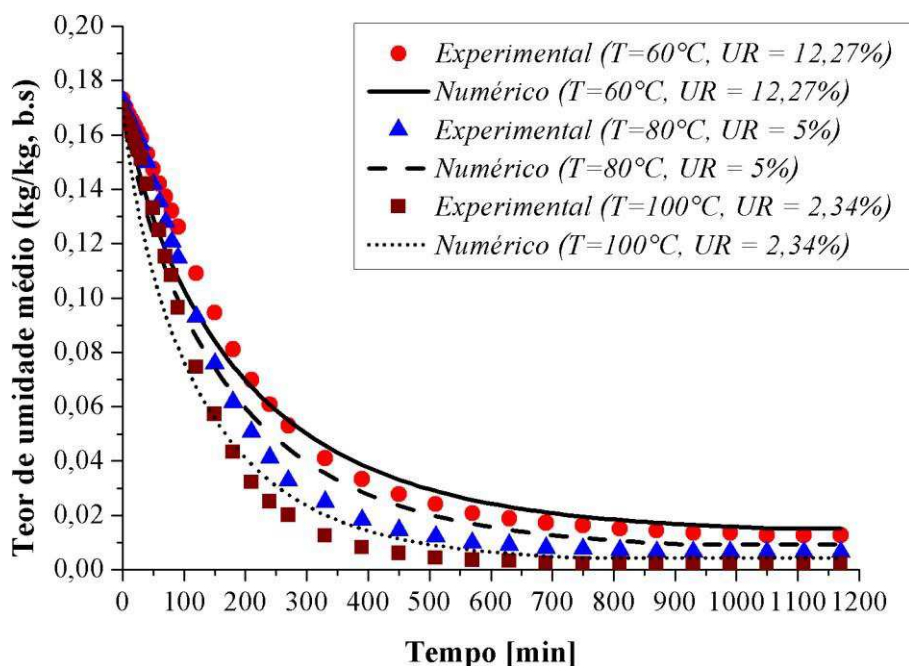


b)

Figura 4.25 Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo para diferentes condições de secagem. a) $T = 50^{\circ}\text{C}$, 70°C e 90°C , e b) $T = 60^{\circ}\text{C}$, 80°C e 100°C .



a)



b)

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam as evoluções da temperatura e do teor de umidade médio do tijolo em função do tempo para secagem a 80°C . Após análise dessas figuras, percebe-se que a perda de umidade ocorre de forma mais lenta comparada ao aquecimento do tijolo como já era o esperado. Isto é decorrente do fato que a difusividade mássica do tijolo é muito menor que a sua difusividade térmica.

Analisando a Figura 4.26, percebe-se uma grande influência da temperatura nos instantes iniciais do processo de aquecimento. Verifica-se que, os primeiros 400 min o tijolo sofre um aquecimento crescente, tendendo a atingir o equilíbrio térmico, para tempos posteriores.

Analisando a Figura 4.27, pode-se observar uma perda de umidade do produto de forma acentuada nos instantes iniciais, atingindo o ponto de equilíbrio higroscópico para longos tempos do processo. Verificou-se ainda, que o teor de umidade do tijolo decresce com o tempo, tendendo para o teor de umidade de equilíbrio, e que, esta condição de equilíbrio ocorre mais rapidamente com o aumento da temperatura.

Figura 4.26 Comportamento transiente da temperatura do tijolo para diferentes condições de secagem.

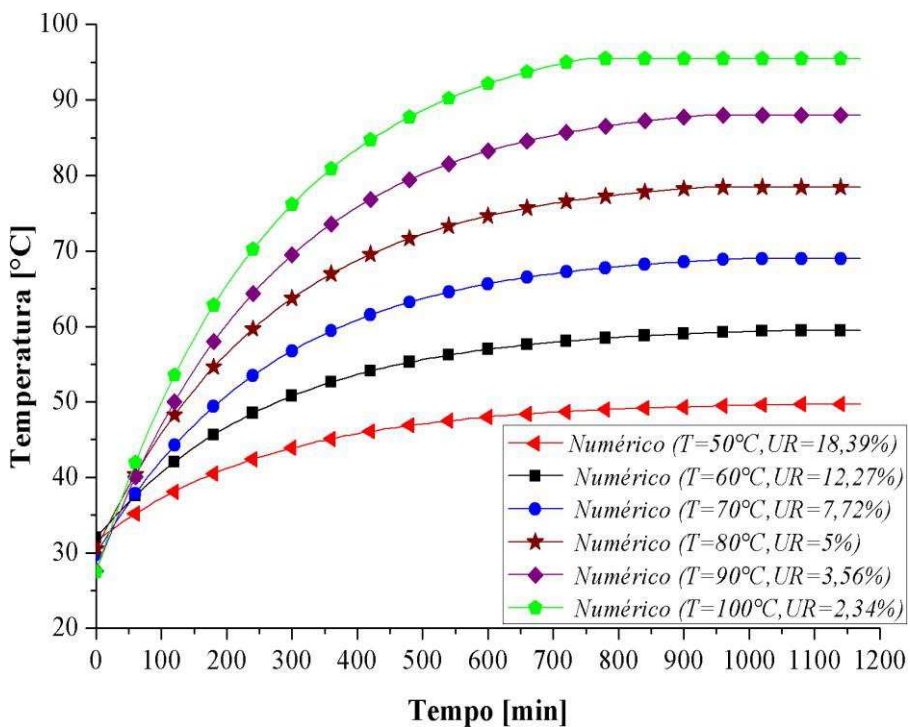
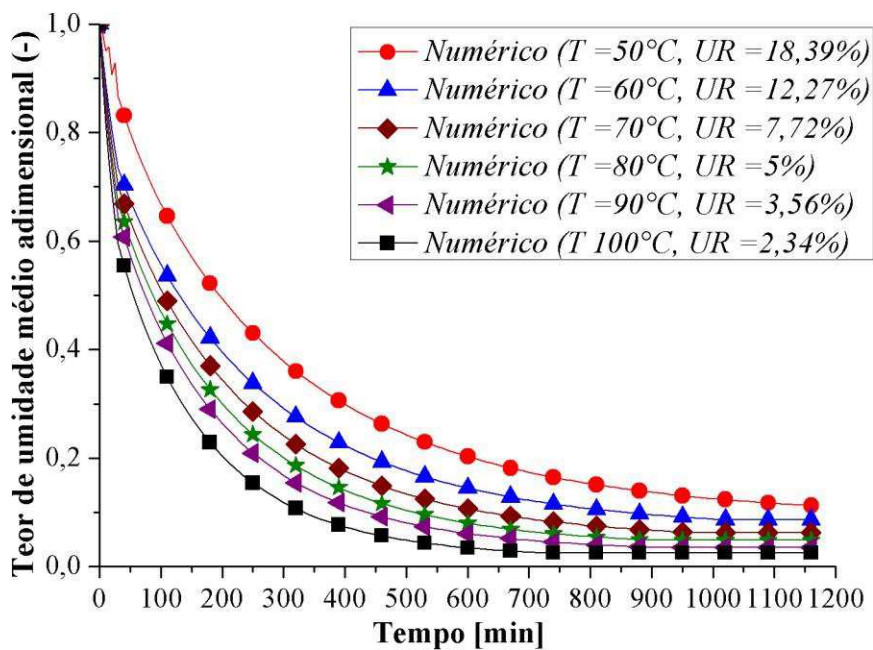


Figura 4.27 Comportamento transiente do teor de umidade médio adimensional do tijolo para diferentes condições de secagem.

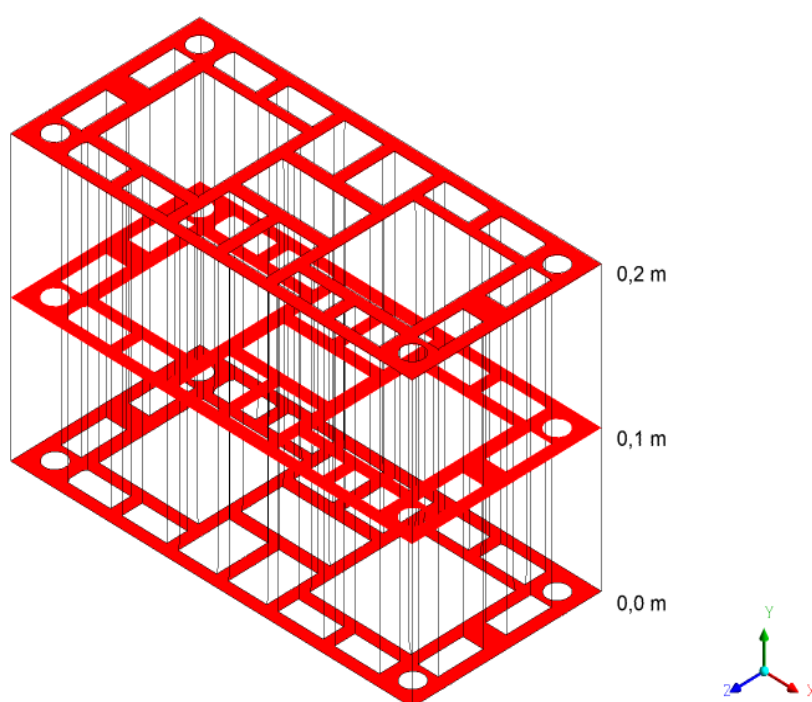


4.2.1.2 Distribuição de temperatura e teor de umidade do tijolo

Os resultados apresentados nesta seção estão direcionados a análise dos fenômenos envolvidos durante a secagem do tijolo compensador isoladamente.

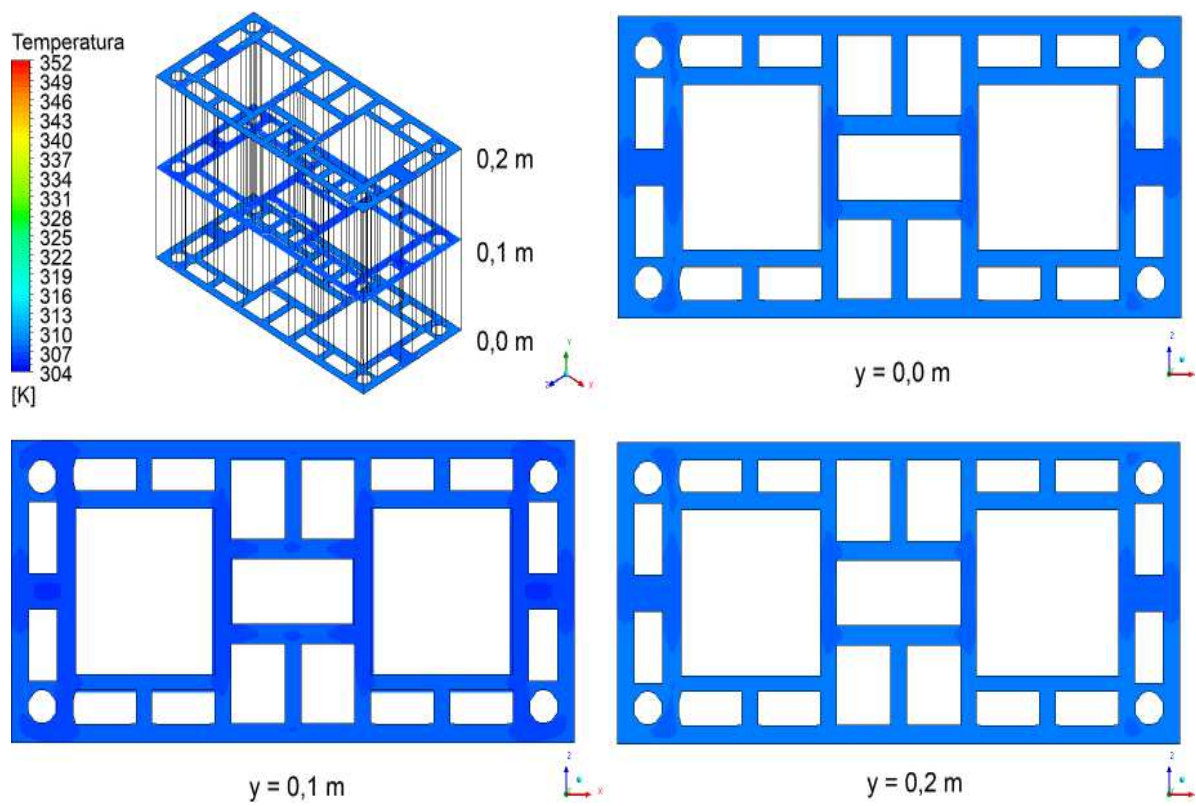
Com objetivo de analisar os comportamentos da temperatura e teor de umidade durante o processo de secagem, foram tomados três planos longitudinais xz, nas posições 0 m; 0,1 m e 0,2 m no tijolo estrutural, como ilustrado na Figura 4.28.

Figura 4.28 Representação dos planos XZ ao longo do domínio, usados para análise térmica e mássica do tijolo.

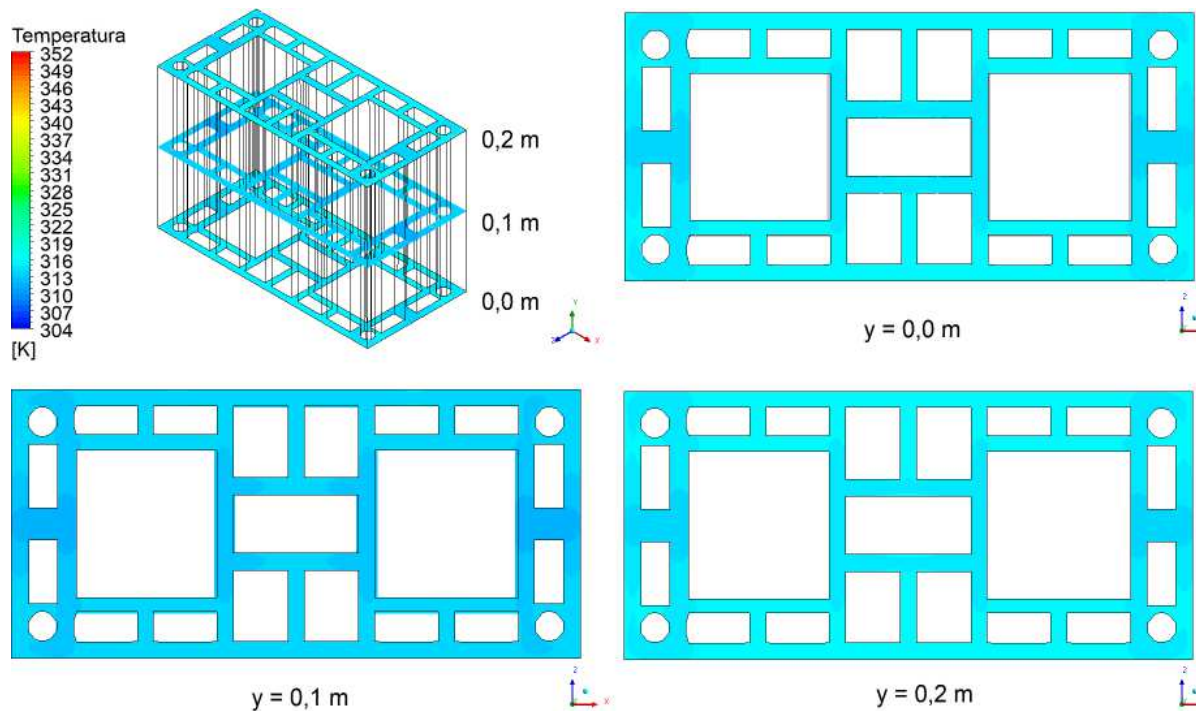


Na Figura 4.29 estão ilustrados os campos de temperatura do tijolo sobre os planos XZ para os instantes $t = 10$ e 30 minutos e a Figura 4.30, para os tempos de $t = 60$ minutos e 15,5 horas. Verificou-se que os gradientes de temperatura estão localizados na região próxima ao vértice do sólido em todos os casos ilustrados, uma vez que estão em contato com o ar de secagem. Estas regiões são mais susceptíveis ao aparecimento de defeitos na peça, que concordam com a afirmação reportada em Keey (1992), Nascimento (2002), Cadé et al. (2005), Lucena (2005) e Avelino (2006). Contudo, nesta análise, verifica-se uma uniformidade aparente de temperatura no interior do tijolo, decorrente de um aquecimento mais lento ($h = 1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Figura 4.29 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de (a) 10 min e (b) 30 min.

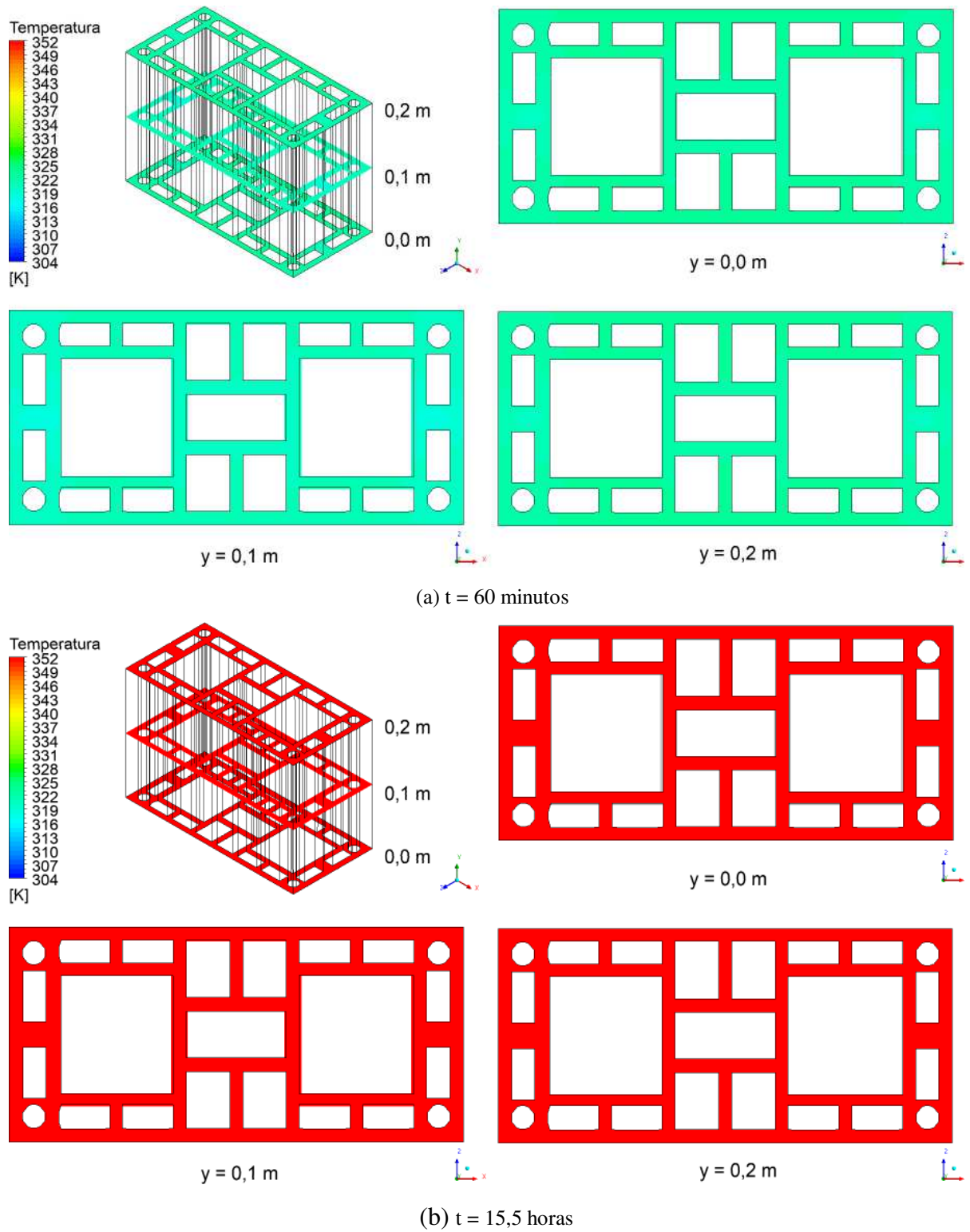


(a) $t = 10$ minutos



(b) $t = 30$ minutos

Figura 4.30 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de (a) 60 min e (b) 15,5 horas.



Os gradientes de temperatura na camada externa do tijolo, pode provocar o surgimento de trincas, deformações e redução das dimensões. Isto é decorrente da secagem ser mais intensa e rápida externamente ao tijolo do que nas suas partes internas. Estas observações são igualmente reportadas por Silva (2009), Brito et al. (2016) e Araujo et al. (2016).

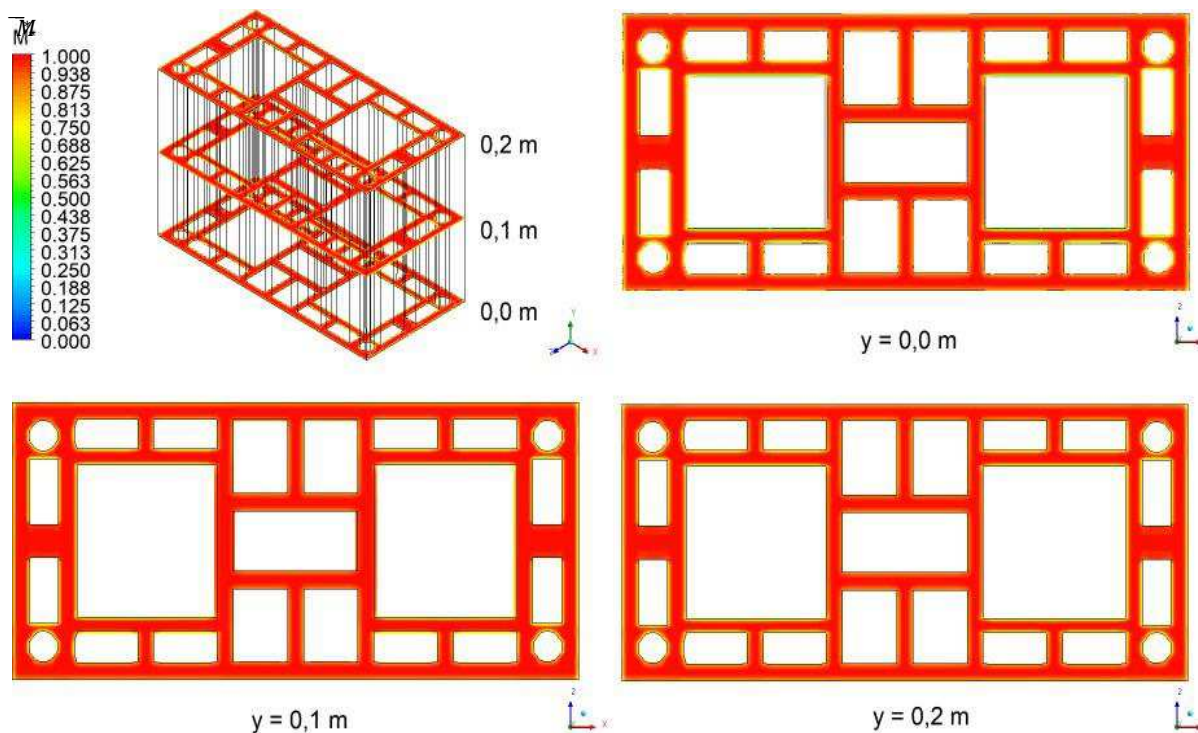
Portanto, é de suma importância que haja uma secagem prévia, que seja controlada e uniforme. Mas, este procedimento não pode ser de maneira lenta, pois pode se tornar antieconômico. Assim, alguns fatores como a pressão do ar, umidade relativa, velocidade do ar, temperatura, dimensões e massa específica do material são usadas para controlar adequadamente a intensidade da secagem.

Percebeu-se ainda que, mesmo depois de um determinado período considerável na secagem, o tijolo não atinge uniformidade a temperatura, ainda há pequenas variações neste parâmetro nas regiões dentro do material.

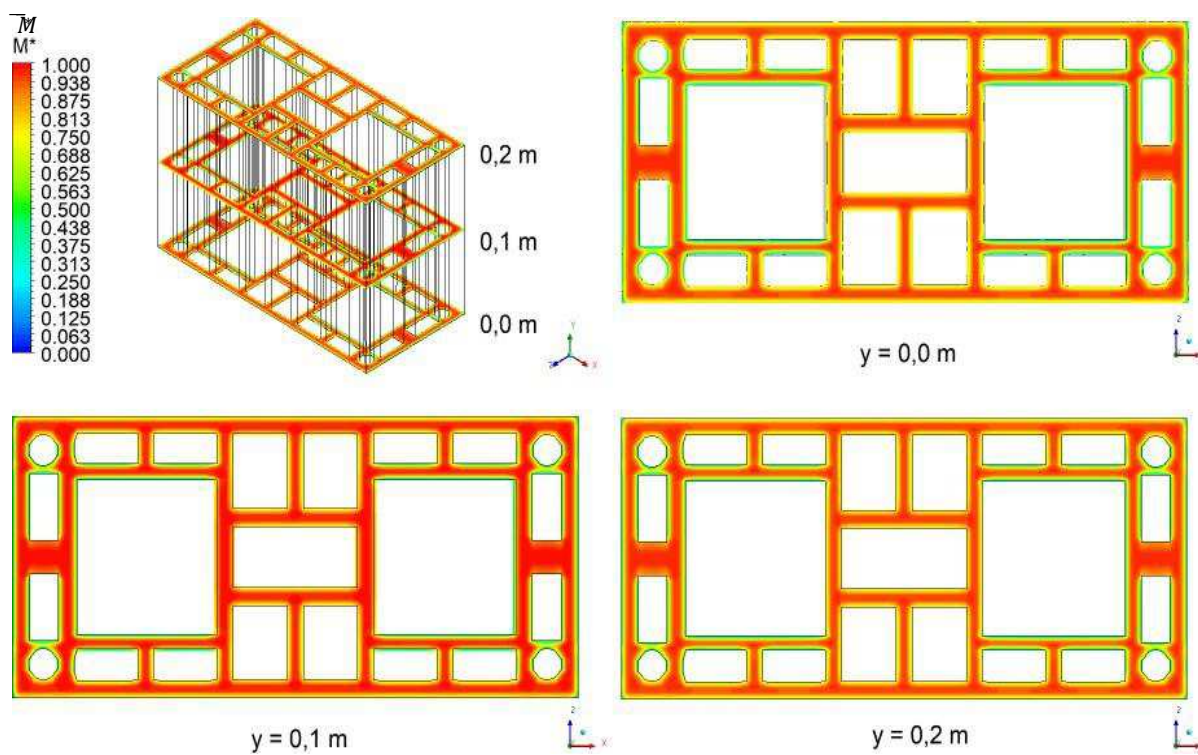
Na Figura 4.31 apresentam-se os campos de teor de umidade sobre os planos XY para os instantes $t = 10$ e 30 minutos, na Figura 4.32 para os tempos de $t = 60$ minutos e $t = 15,5$ horas. Vale ressaltar, que, foi considerado como condição de contorno prescrita uma umidade de equilíbrio igual a $0,000826$ (kg/kg, b.s) sobre todas as faces do tijolo, que é equivalente a uma condição de equilíbrio higroscópico instantâneo. Observa-se que os maiores gradientes de umidade na região próxima ao vértice do sólido em todos os tempos ilustrados, devido ao fato de que esta região está em contato mais intenso com o ar de secagem. O teor de umidade, apresenta os maiores resultados no centro do mesmo em qualquer tempo. Percebe-se também o decréscimo do teor de umidade com o tempo, em qualquer posição, tendendo para o seu teor de umidade de equilíbrio, para tempos de secagem suficientemente longos.

Como a temperatura na parede do tijolo é maior do que a temperatura no interior deste, o fluxo de calor ocorre da superfície para o centro do tijolo, em oposto ocorre o fluxo de massa. Estes fenômenos acoplados podem gerar elevadas tensões no interior do tijolo, dando espaço ao apareamento de trincas, rachaduras e deformações. Estes defeitos, gerados pelos gradientes de umidade e temperatura, podem provocar tensões trativas e compressivas, não aceitáveis, que reduzem drasticamente a qualidade do produto no final do processo (SILVA, 2018).

Figura 4.31 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de a) 10 min e b) 30 min.

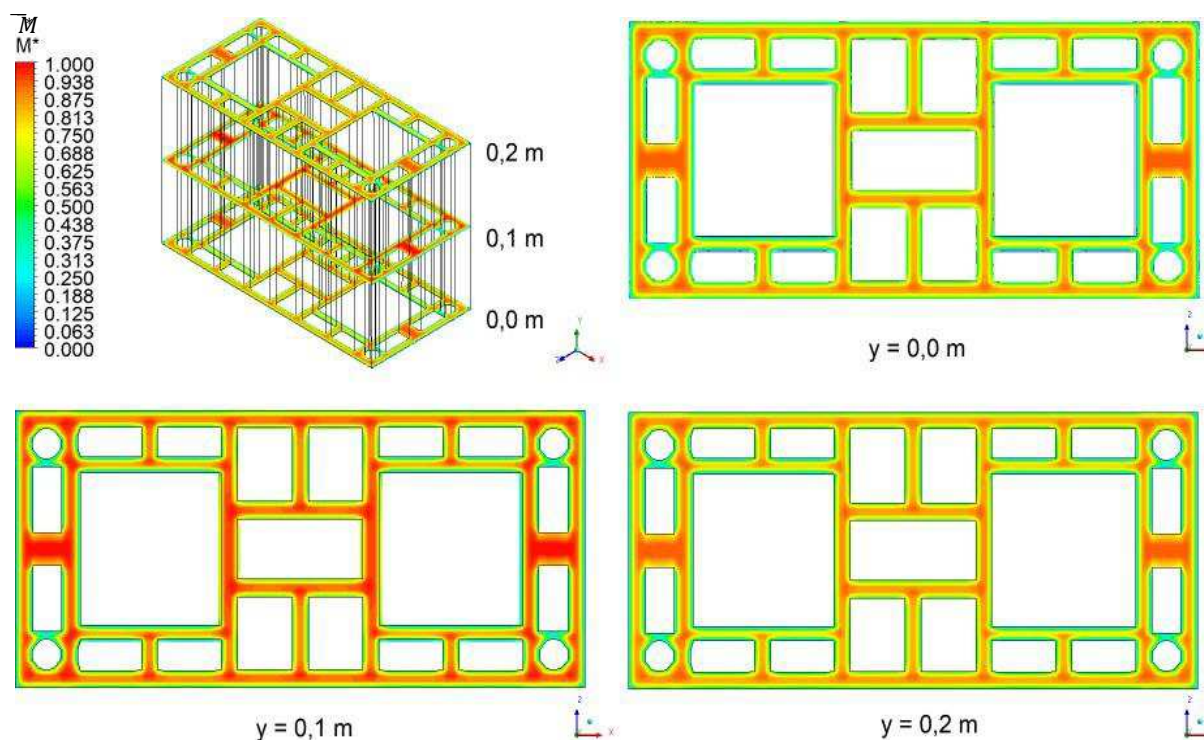


(a) $t = 10$ minutos

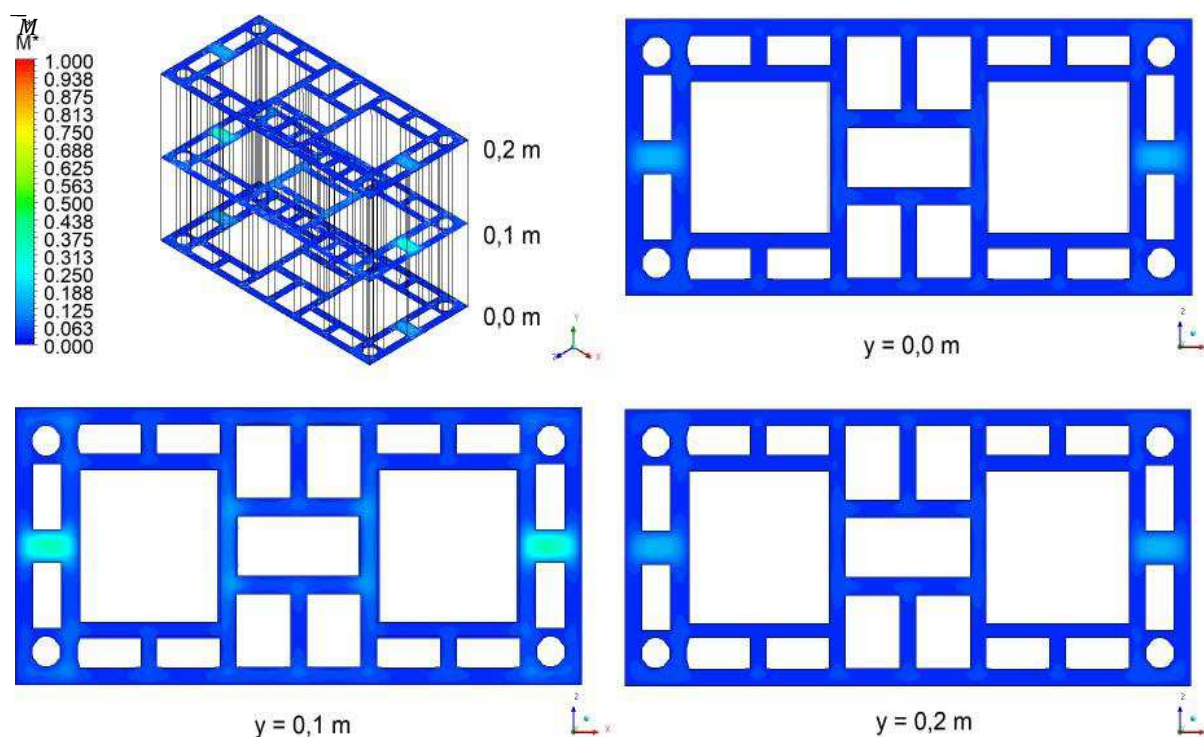


(b) $t = 30$ minutos

Figura 4.32 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de a) 60 min e b) 15,5 horas.



(a) t = 60 minutos



(b) t = 15,5 horas

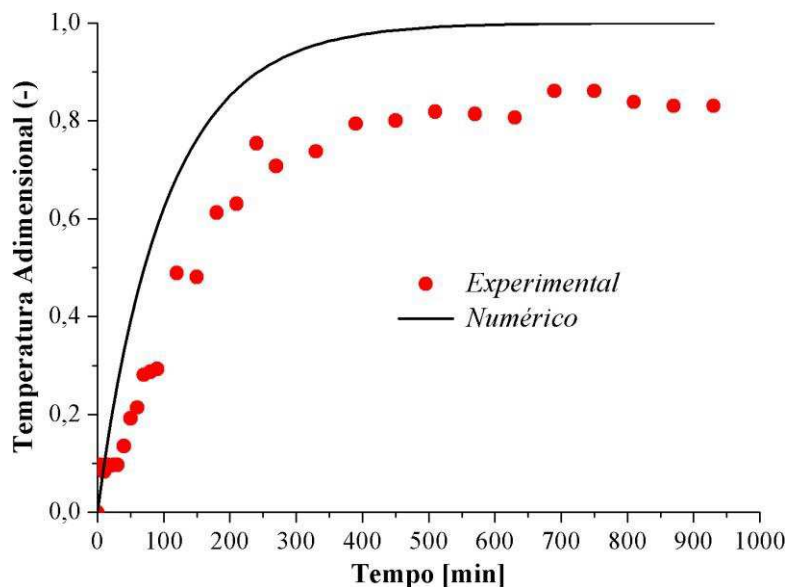
4.2.2 Secagem do tijolo compensador em estufa

4.2.2.1 Cinéticas de secagem e aquecimento

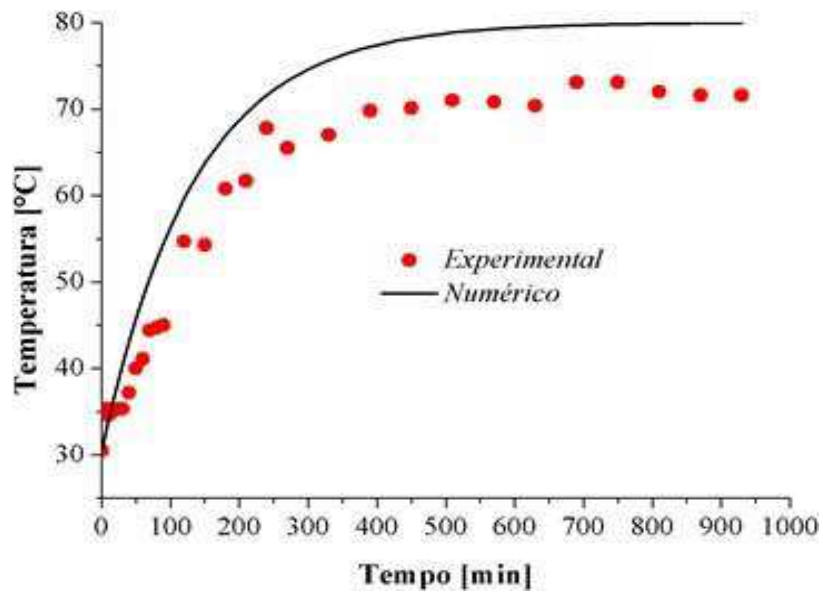
Toda validação para este caso foi realizada de maneira análoga ao caso secagem do tijolo compensador. Assim, para analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção da água do tijolo estrutural, seis casos foram escolhidos para simulação, como apresentado na Tabela 4.7.

As Figuras 4.33 e 4.34 ilustram a evolução da temperatura na superfície adimensional do tijolo, dimensional e do teor de umidade médio em função do tempo de secagem, quando a temperatura no interior da estufa é 80°C. Na Figura 4.35, apesar de usar uma condição de contorno convectiva na superfície do tijolo, nota-se um comportamento semelhante ao observado na Figura 4.21, quando se usou no tijolo com uma condição de contorno nas suas faces igual a umidade de equilíbrio e coeficiente de transferência de matéria infinita.

Figura 4.33 Temperatura da superfície do tijolo na estufa em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $UR = 5\%$). a) Adimensional e b) Dimensional.

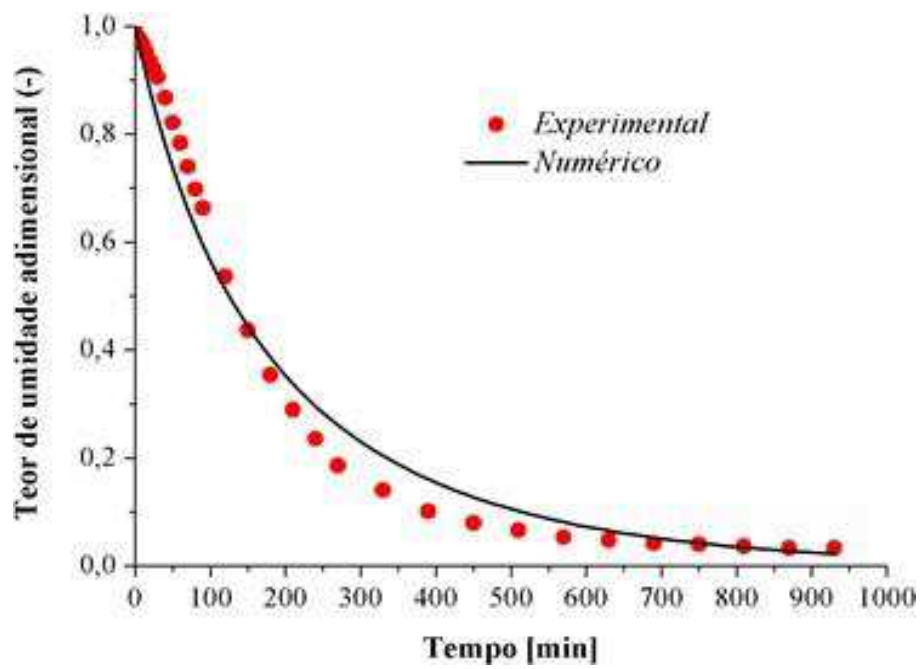


a)

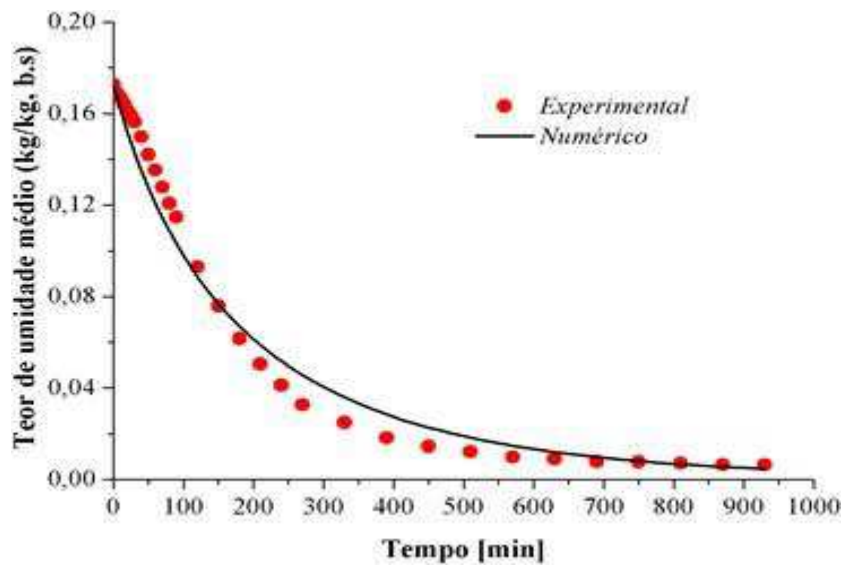


b)

Figura 4.34 Teor de umidade médio do tijolo na estufa em função do tempo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $UR = 5\%$). a) Adimensional e b) Dimensional.



a)



b)

Após a análise da Figura 4.34 verificou-se, que o teor de umidade existente no início do processo de secagem é exponencialmente reduzido até alcançar o teor de umidade de equilíbrio no final do processo. Este comportamento demonstra a inexistência do período de taxa de secagem constante, assim o processo de secagem da peça acontece apenas no período de taxa decrescente de secagem. A fase de umidade decrescente é governada pela migração interna de umidade; essa fase se caracteriza pelo declínio da taxa de secagem. Uma vez que a umidade do produto diminui durante o processo de secagem, a taxa do movimento interno de umidade também diminui e, assim, a taxa de secagem cai rapidamente. Uma análise nesta figura, possibilita concluir que existe uma boa concordância entre dados experimentais e simulação nos instantes iniciais até cerca de 200 min. A partir deste instante, até 500 min aproximadamente, percebe-se certa discrepância entre os resultados simulados e os dados experimentais, indicando que a difusividade efetiva neste intervalo de tempo deveria ter um valor diferente do que nos instantes iniciais, ou até mesmo pelo fato de não ter levado em consideração o encolhimento do material, propriedade esta que pode ter um significativo efeito na difusividade de massa e, conseqüentemente na taxa de remoção da umidade.

Para este caso, também realizou um estudo estatístico onde foi determinado as medidas de dispersão, correlação e aplicação da distribuição t Student, em que se obteve um intervalo de confiança para análise dos dados. De maneira análoga, efetuou-se várias simulações com objetivo de se obter a curva com resultados numéricos que melhor se ajustasse aos dados experimentais. Os resultados obtidos, forneceram um menor desvio padrão igual a $9,13 \times 10^{-03}$ e $8,76 \times 10^{-03}$ e variância igual a $83,3 \times 10^{-05}$ e $7,67 \times 10^{-05}$ para os parâmetros temperatura e teor de

umidade, respectivamente. Para verificar o quanto os dados estavam correlacionados, determinou-se o coeficiente de Pearson, o qual indicou um ótimo acordo entre os mesmos (ver em Apêndice B). Para finalizar, a partir da distribuição t Student obteve-se um intervalo de confiança a partir dos dados experimentais ao nível de confiança de 95%. Percebeu-se que os dados numéricos obtidos indicam um comportamento plausível para o parâmetro baseado nos dados experimentais, o que significa que os mesmos estão dentro dessa faixa de confiança (Figuras 4.35 e 4.36).

Figura 4.35 Intervalo da t Student com 95% de confiança para temperatura do tijolo em estufa em função do tempo de secagem (T = 80°C, UR = 5%).

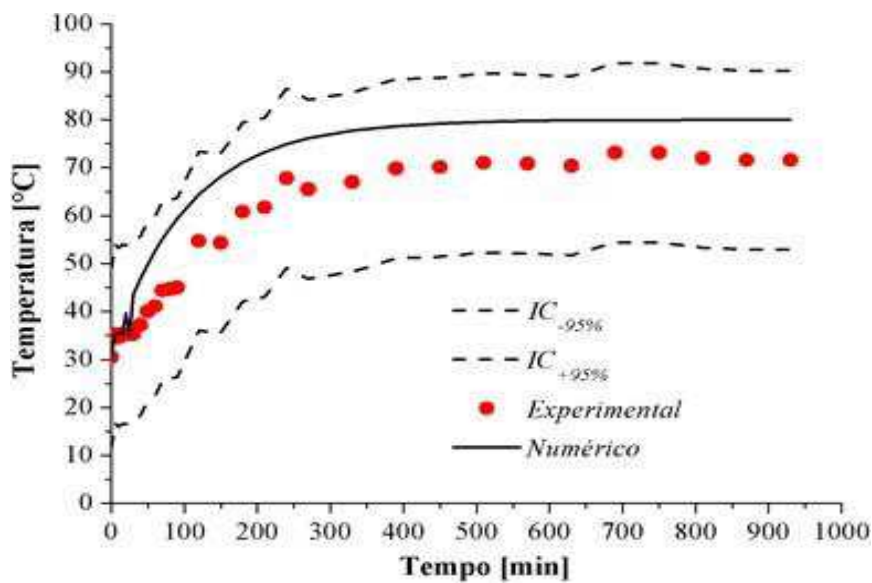
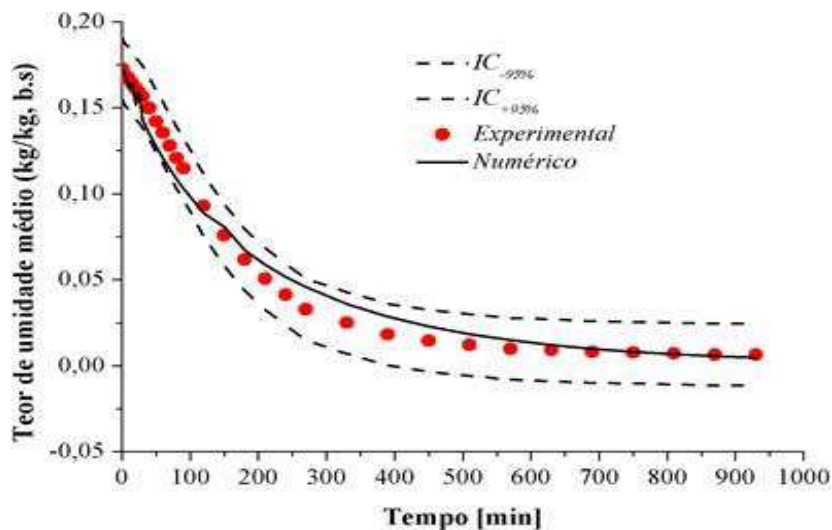
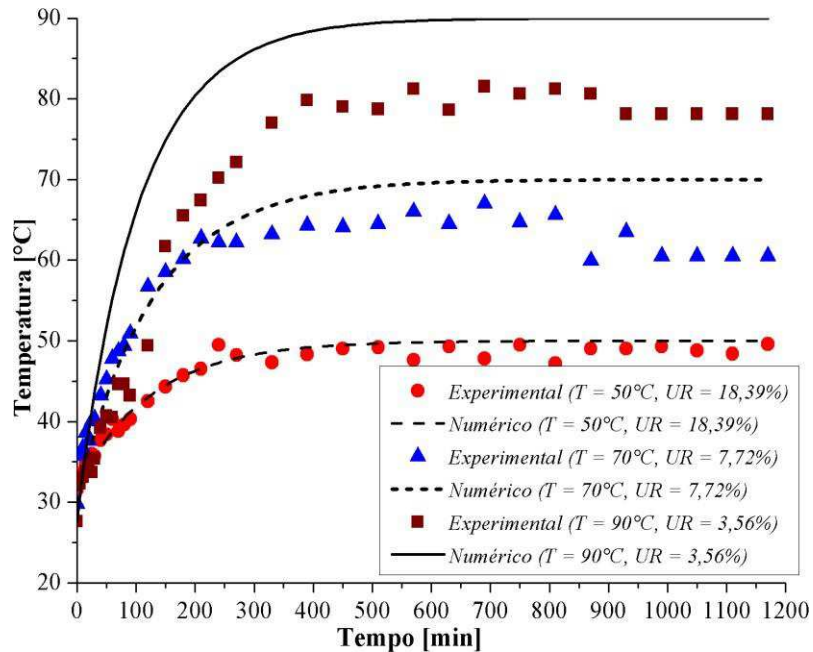


Figura 4.36 Intervalo da t Student com 95% de confiança para teor de umidade médio do tijolo em estufa em função do tempo de secagem (T = 80°C, UR = 5%).

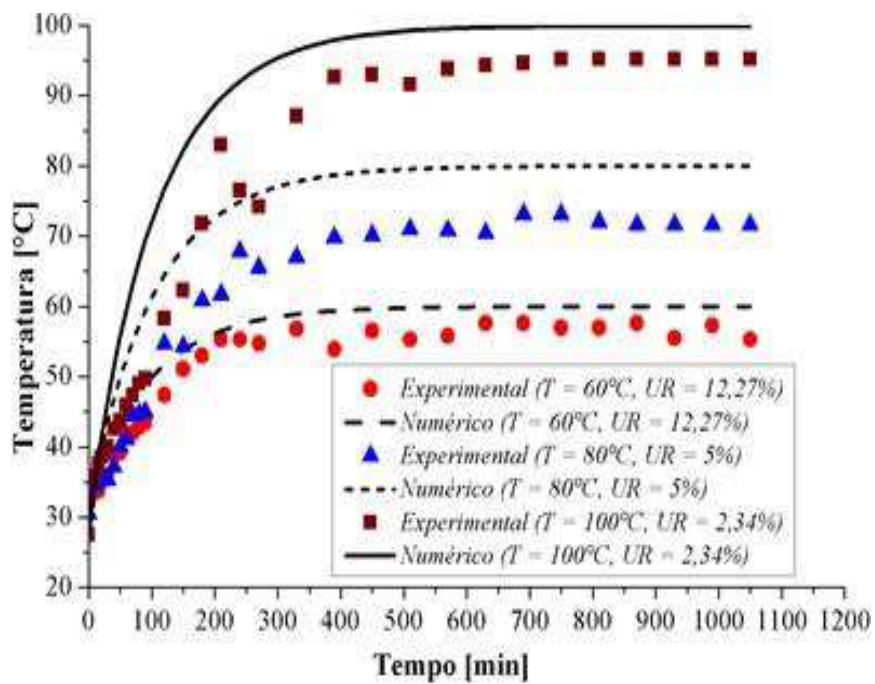


As Figuras 4.37 e 4.38 ilustram de forma comparativa o estudo realizado com as diferentes temperaturas indicadas na Tabela 4.7, considerando o tijolo no interior da estufa.

Figura 4.37 Temperaturas do tijolo em função do tempo no tijolo para diferentes condições de secagem.
a) $T = 50^{\circ}\text{C}$, 70°C e 90°C , e b) $T = 60^{\circ}\text{C}$, 80°C e 100°C .

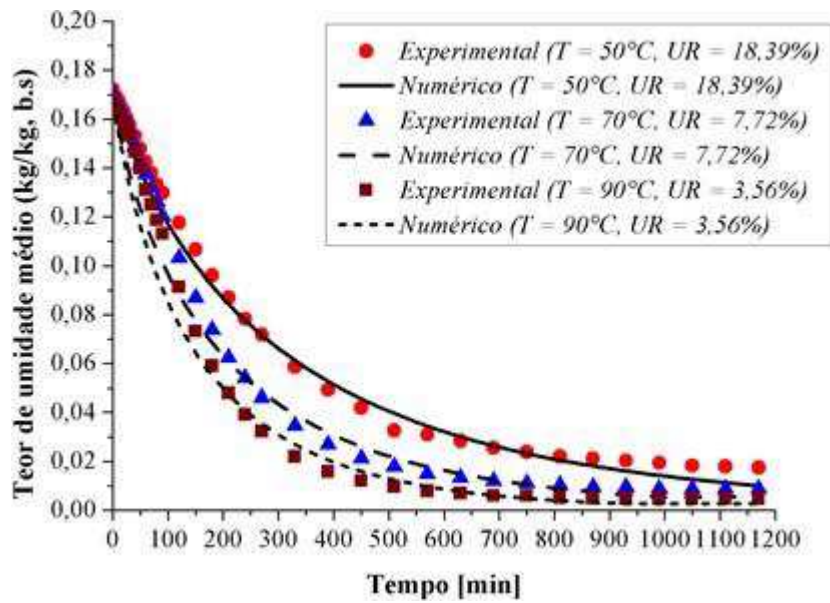


a)

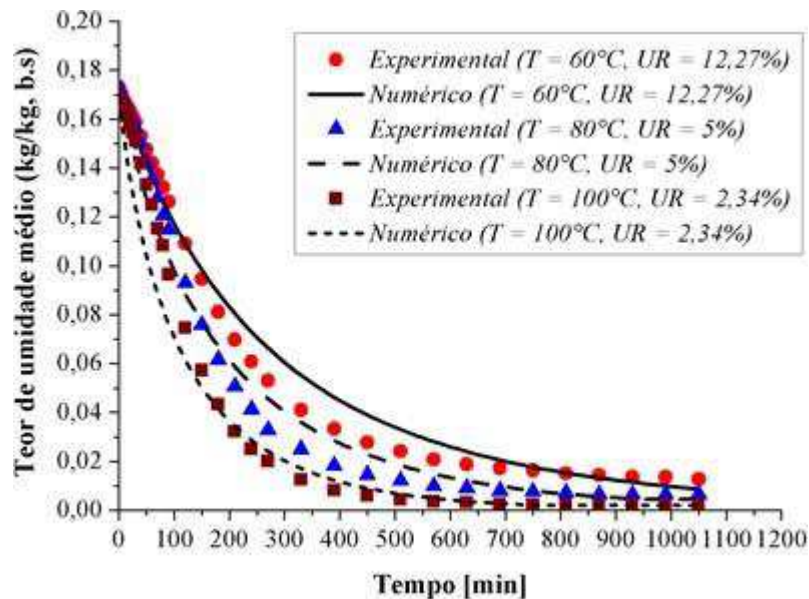


b)

Figura 4.38 Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo para diferentes condições de secagem. a) $T = 50^{\circ}\text{C}$, 70°C e 90°C , e b) $T = 60^{\circ}\text{C}$, 80°C e 100°C .



a)



b)

Após análise destas figuras, percebeu-se que o aumento da temperatura de secagem influencia acentuadamente o processo de secagem, diminuindo o teor de umidade do tijolo e o tempo final de secagem. Tal fato ocorre devido ao aumento da disponibilidade de energia para a vaporização da água e da elevação do coeficiente de transferência de massa com o aumento da temperatura de secagem.

Analisando os valores do tempo e temperatura de secagem, verificou-se que a temperatura do tijolo estrutural sofre uma grande influência da temperatura do ar no interior da estufa principalmente nos instantes iniciais do processo. Pode-se verificar que a temperatura do tijolo sofre um aquecimento crescente nos primeiros 400 minutos, tendendo, após esse tempo, a atingir o equilíbrio térmico. As diferenças observadas entre os dados numéricos e experimentais pode ser explicada, segundo Silva (2018), pelo fato de que as medições realizadas no tijolo durante os experimentos, foram feitas fora da estufa, ocasionando resfriamento na peça. Além disso, pode ser atribuído também à posição do tijolo na estufa.

Na Figura 4.39 apresenta-se o comportamento do teor de umidade médio em função do tempo de secagem para temperaturas de 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C e 100°C. Verifica que a temperatura tem uma forte influência na taxa de variação de umidade, ou seja, quanto maior for a temperatura maior será a perda de umidade e menor será o tempo total de secagem até a peça cerâmica atingir a condição de umidade de equilíbrio. Em todas as simulações realizadas adotou-se a velocidade do ar igual a $v = 1 \text{ m/s}$, obtida dos experimentos realizados por Silva (2018). É possível ver que a secagem ocorre de forma satisfatória, e que no final ter-se-a um produto com teor de umidade menor que 1%.

A Figura 4.40 ilustra o comportamento da temperatura do tijolo em diferentes condições operacionais de secagem. Uma análise desta figura possibilita averiguar um comportamento similar ao obtido pelo tijolo avaliado isoladamente (Figura 4.26).

Figura 4.39 Comportamento transiente do teor de umidade médio adimensional do tijolo em estufa, para diferentes condições de secagem.

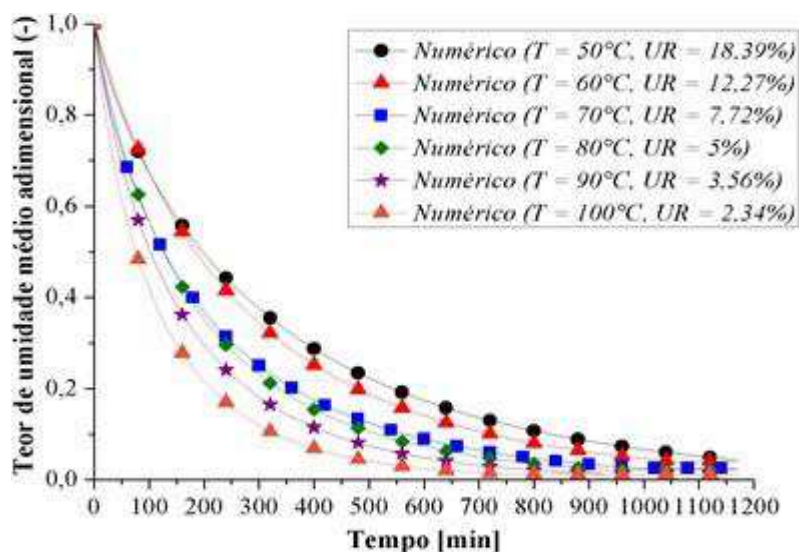
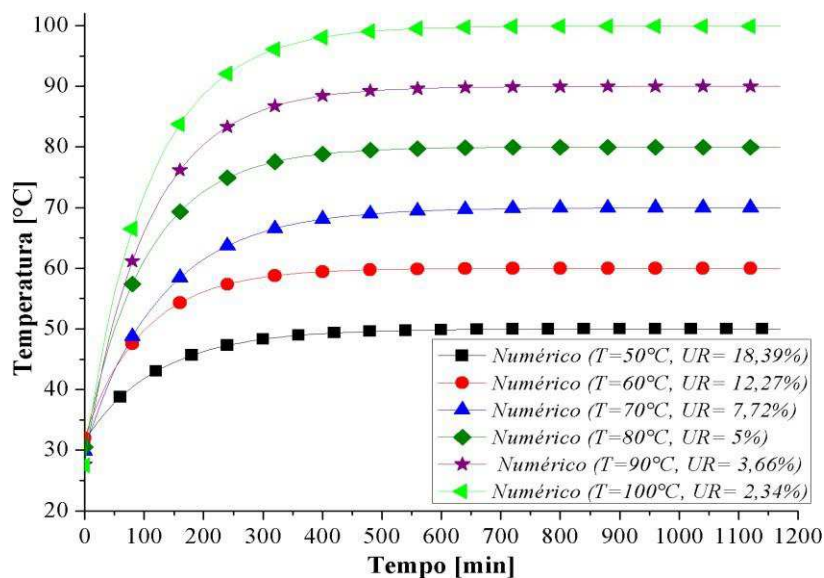


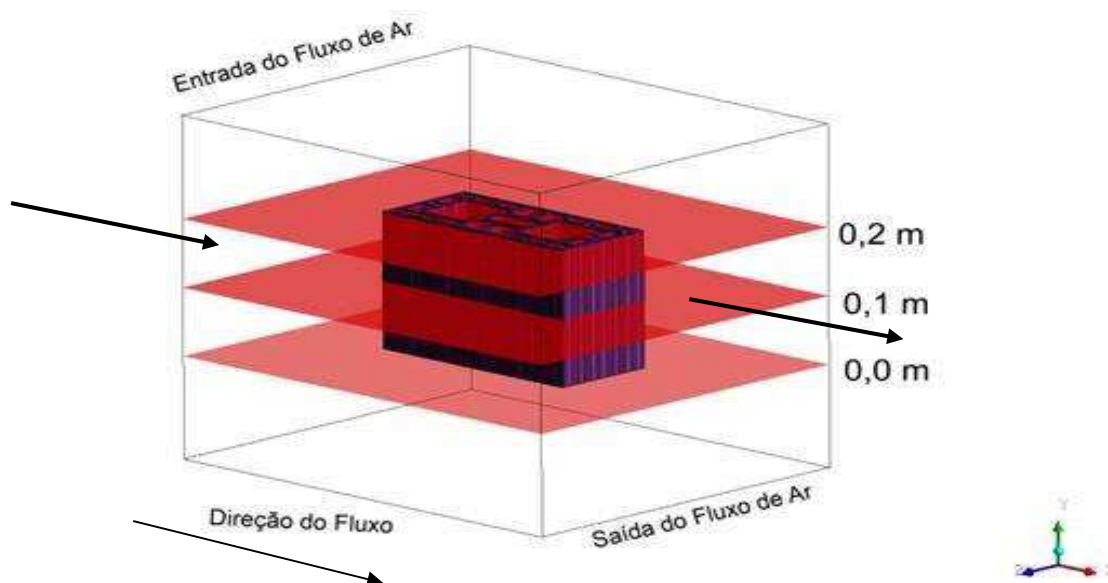
Figura 4.40 Comportamento transiente da temperatura do tijolo em estufa, para diferentes condições de secagem.



4.2.2.2 Análise térmica e mássica do tijolo e ar na estufa

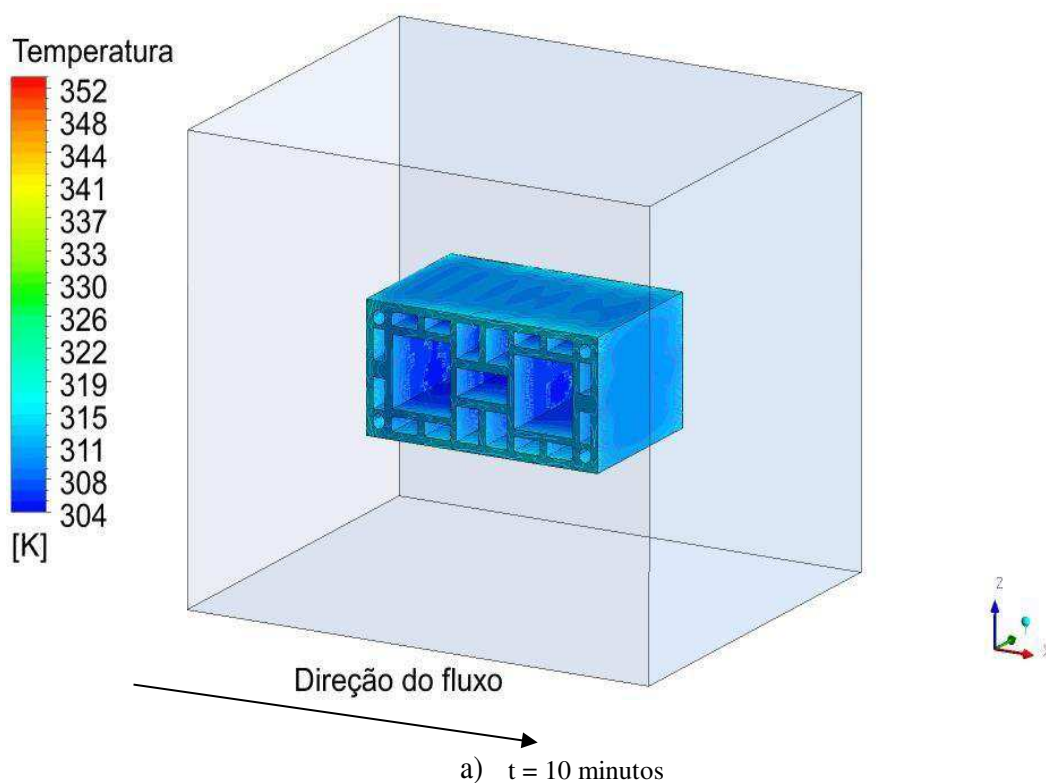
Na Figura 4.41 estão representados três planos longitudinais XZ em diferentes posições $y = 0$ m; 0,1 m e 0,2 m no tijolo estrutural, onde serão analisados os comportamentos da temperatura e teor de umidade do tijolo, e temperatura, pressão e vetor velocidade do ar de secagem no interior da estufa. Nesta figura indica-se, ainda, a direção do fluxo de ar na estufa.

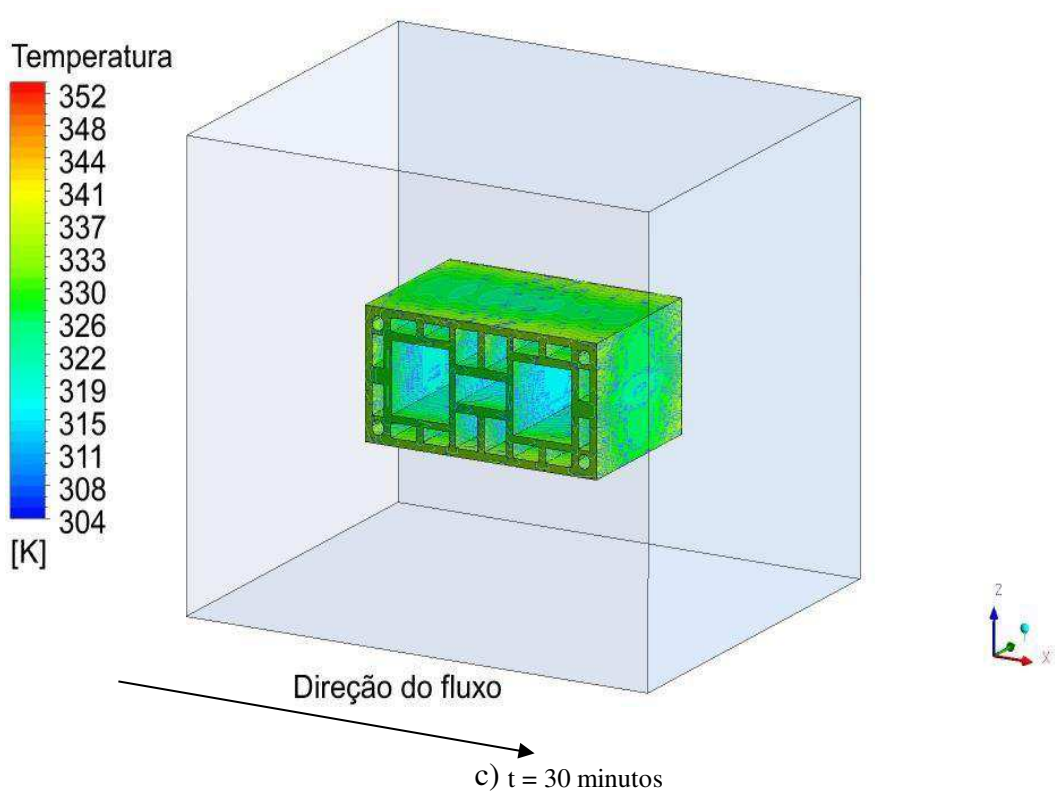
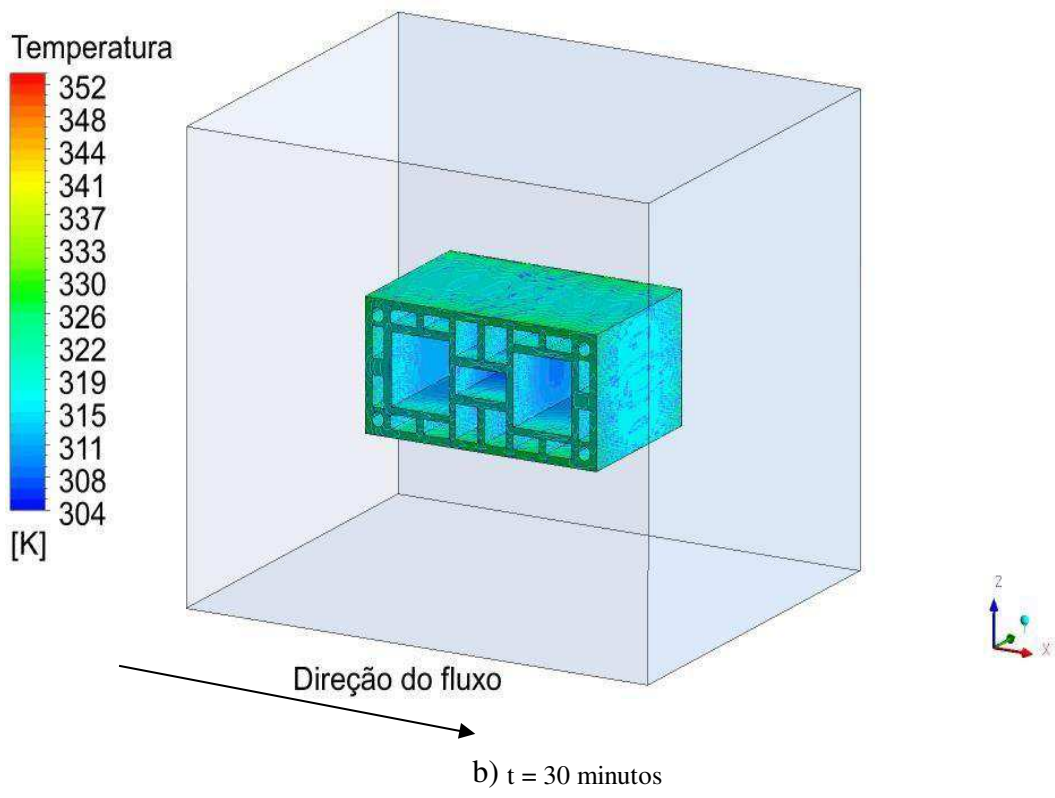
Figura 4.41 Representação dos planos XZ ao longo dos domínios, usados na análise termo-fluidodinâmica do sistema tijolo-ar de secagem.

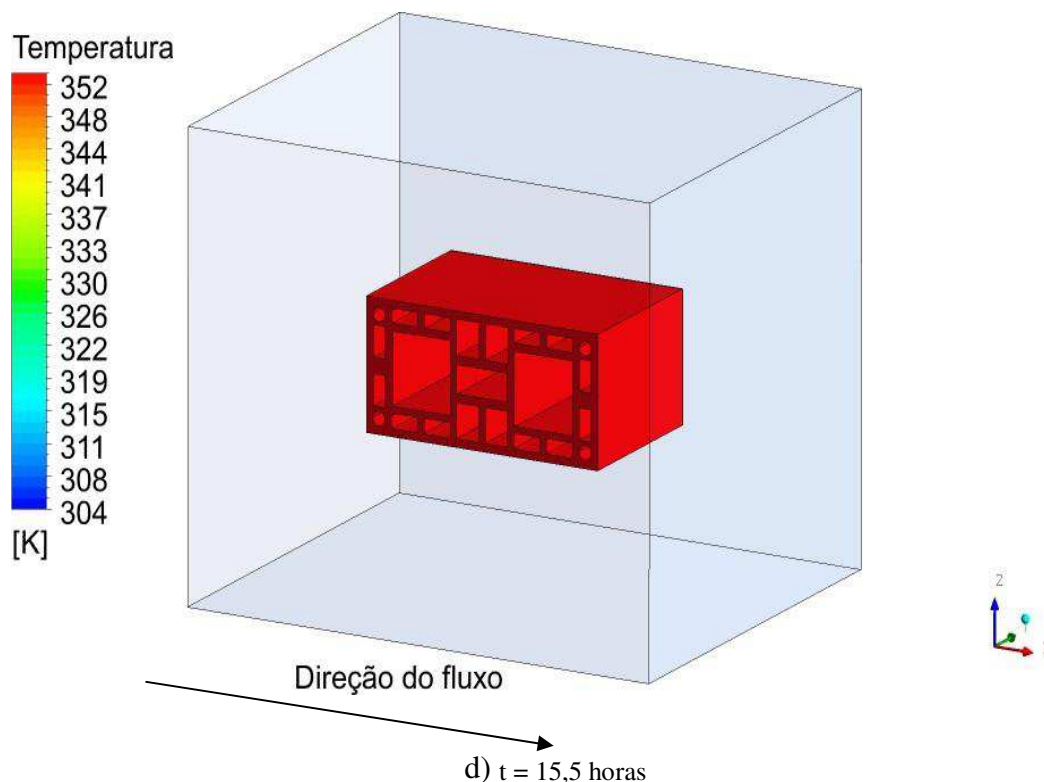


De acordo com as Figuras 4.42, 4.43 e 4.44 as quais ilustram as distribuições de temperatura na superfície e no interior (Plano XZ) do tijolo nos instantes $t = 10, 30, 60$ minutos e 15,5 horas, verificou-se que a temperatura na superfície do tijolo de uma maneira em geral, aumenta com o tempo. Verifica-se que, a região localizada no centro do sólido, nos instantes iniciais apresenta uma menor temperatura, devido a difusão térmica em direção ao centro do sólido. Por outro lado, na fronteira, a variação de temperatura é mais acentuada, já que nesses locais o processo de difusão é mais rápido devido ao contato direto do tijolo com o meio ambiente.

Figura 4.42 Distribuição de temperatura na superfície do tijolo nos temp de secagem de a) 10 min, b) 30 min, c) 60 min e d) 15,5 horas.



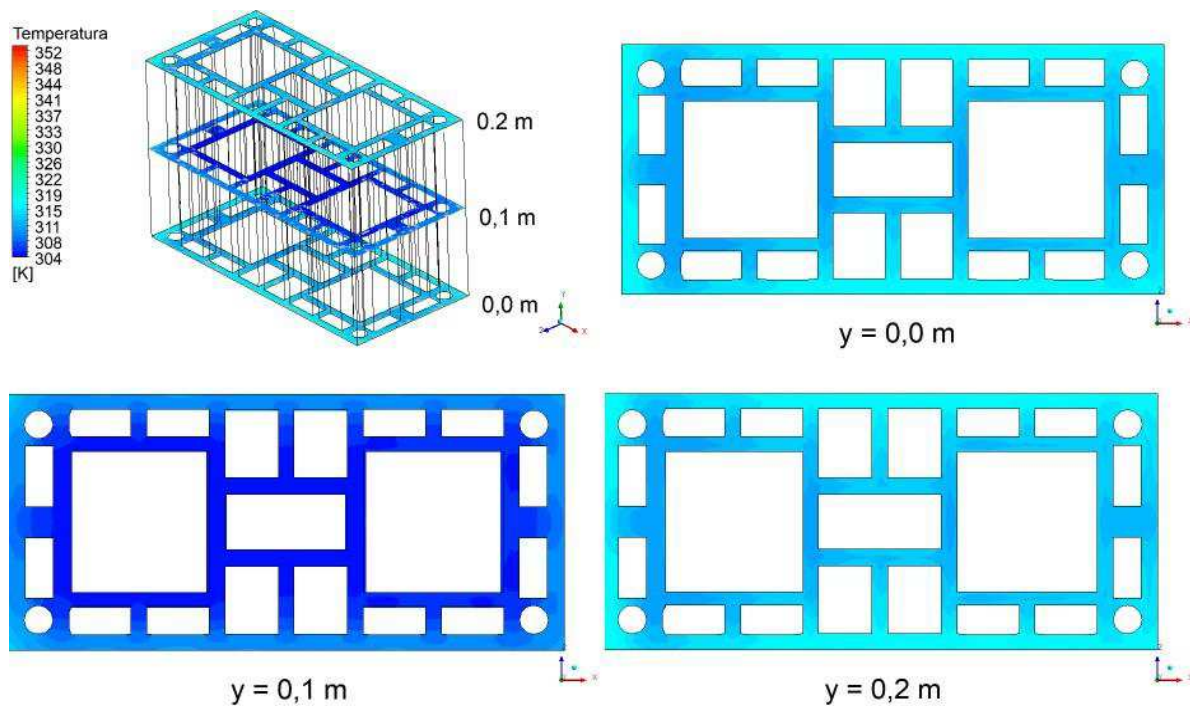




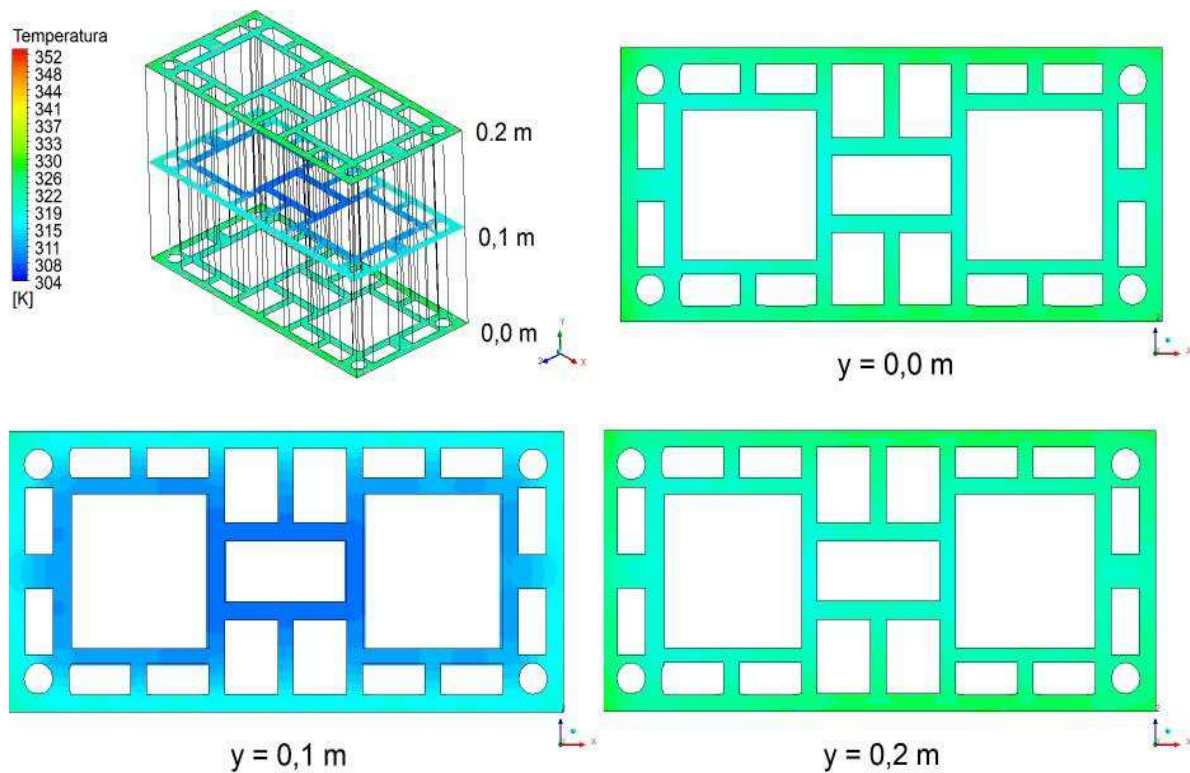
As Figuras 4.45 e 4.46 ilustram os campos de temperatura do ar de secagem na estufa sobre os planos $y = 0$ m; 0,1 m e 0,2 m transversal ao sólido para os instantes 10 e 30 minutos, e 60 minutos e 15,5 h, respectivamente. Verificou-se que os maiores gradientes de temperatura se encontram nas vizinhanças do tijolo próxima aos vértices do mesmo, enquanto que no interior tem-se os menores gradientes, pois os vértices são regiões que não estão em contato direto com o fluxo de ar de secagem. Observou-se que, após 1 hora de fluxo de ar ainda há diferença entre os valores da temperatura do tijolo e do ar, ou seja, o tijolo ainda não entrou em equilíbrio térmico com o ar de secagem. Note que, o ar, quando está fluindo sobre o produto, perde energia térmica para ele, como esperado. A perda de energia térmica pode ser observada na região do plano próximo ao material em análise (região à direita do tijolo). Vale salientar que o ar flui da esquerda para direita nessas figuras.

Os baixos gradientes de temperatura no interior do tijolo ocorrem devido a combinação da resistência condutiva do meio sólido tijolo com o baixo coeficiente de transferência de calor convectivo na estufa, características de situação física em ambientes sob convecção natural.

Figura 4.43 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XZ, nos tempos de secagem de a) $t = 10$ min e b) 30 min ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).

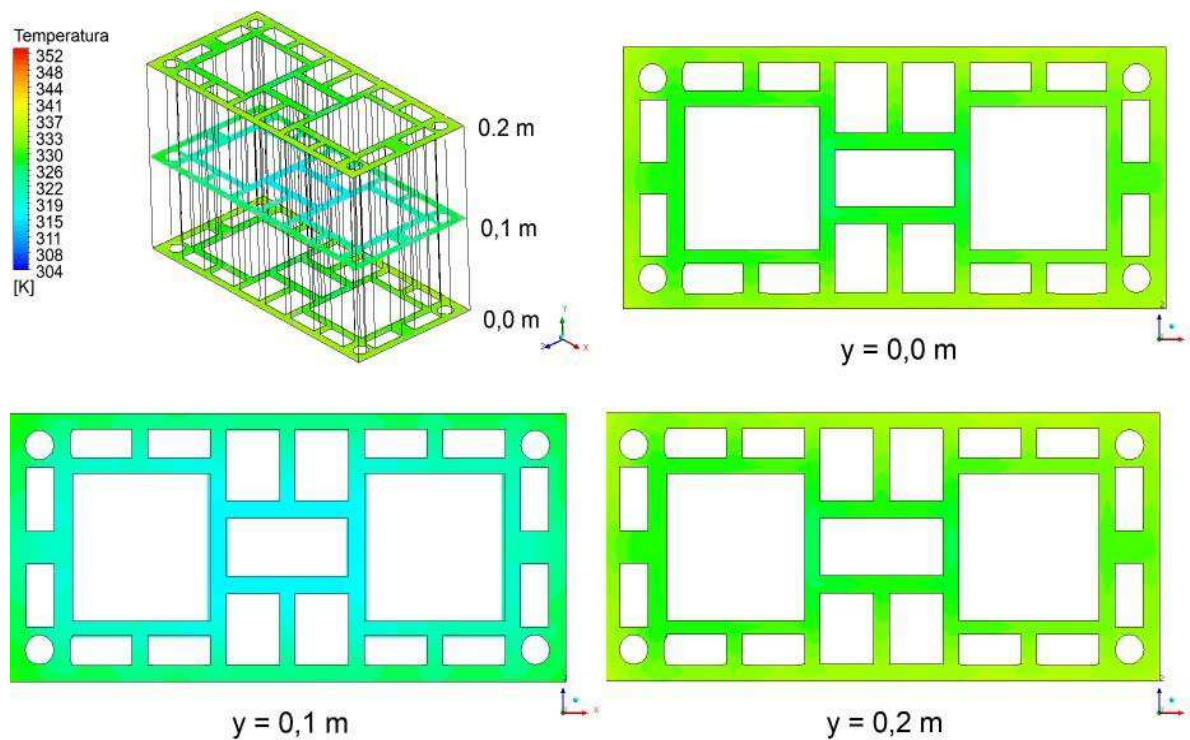


a) $t = 10$ minutos

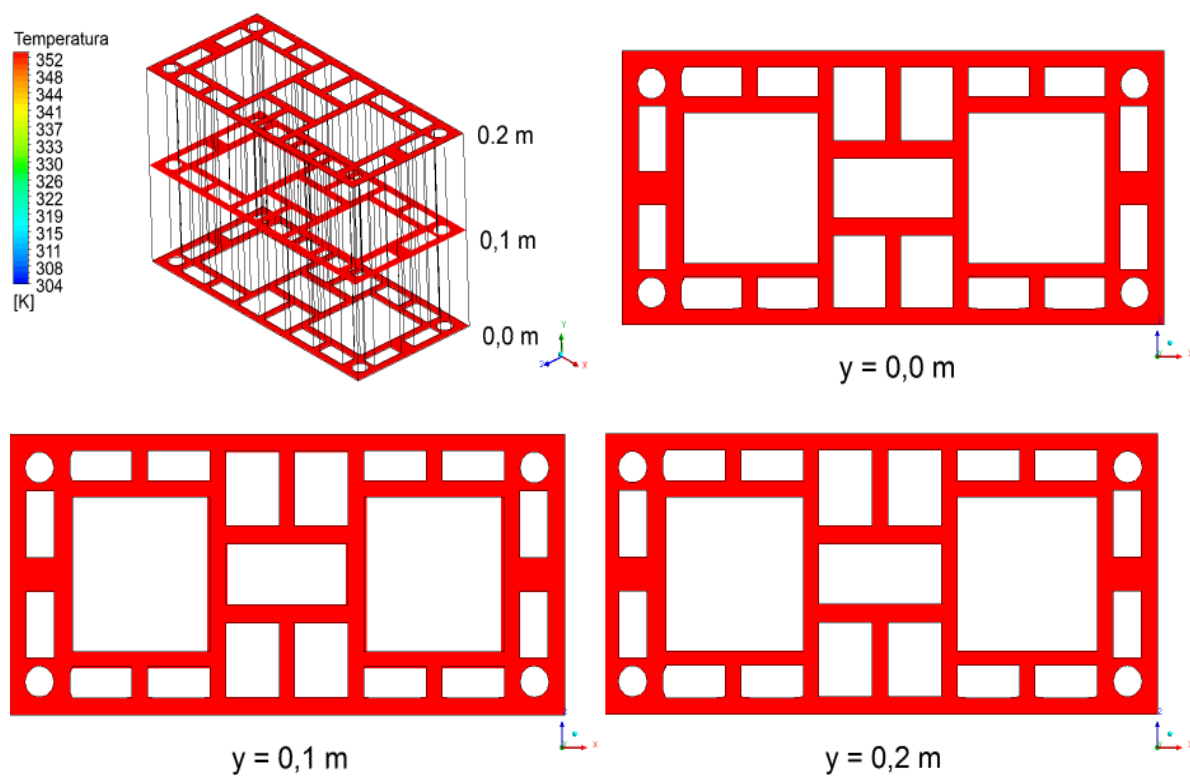


b) $t = 30$ minutos

Figura 4.44 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XZ, nos tempos de secagem de a) $t = 60$ min e b) 15,5 horas ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).



a) $t = 30$ minutos



b) $t = 15,5$ horas

Figura 4.45 Distribuição de temperatura no ar e tijolo, em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de (a) 10 min e (b) 30 min ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).

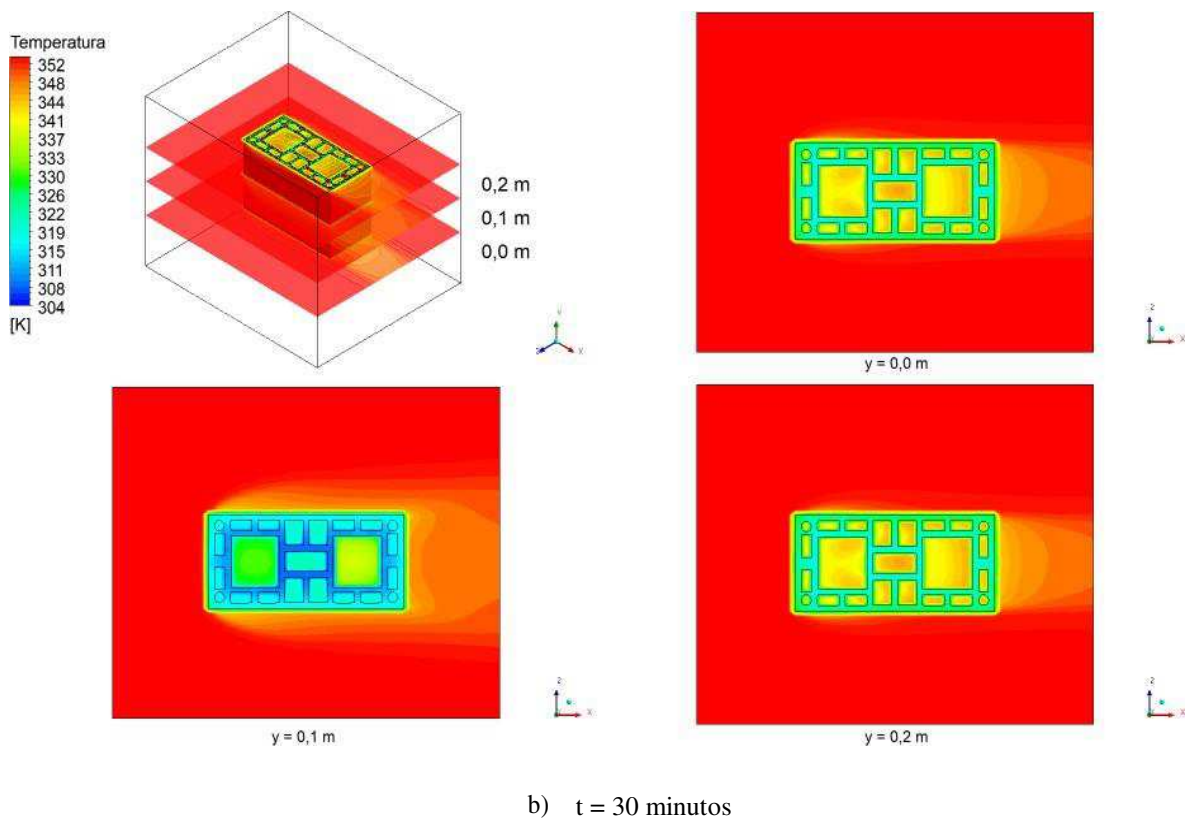
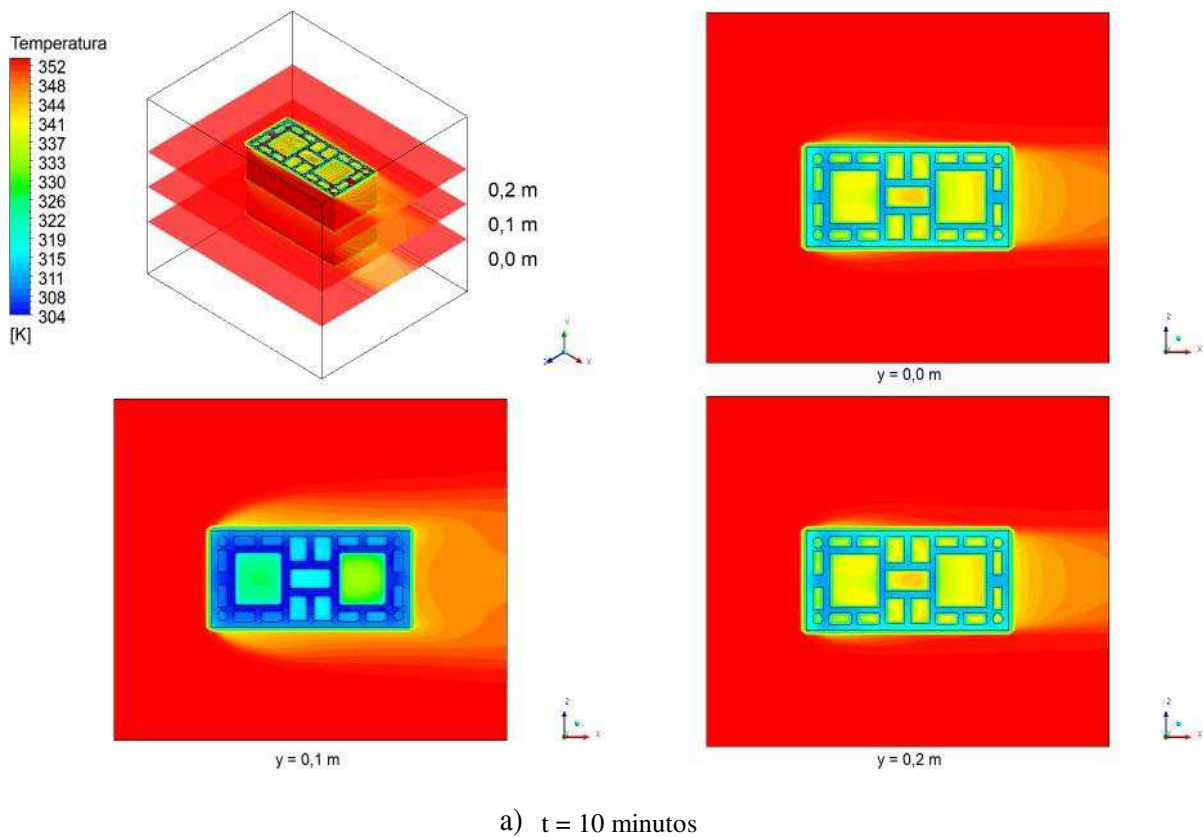
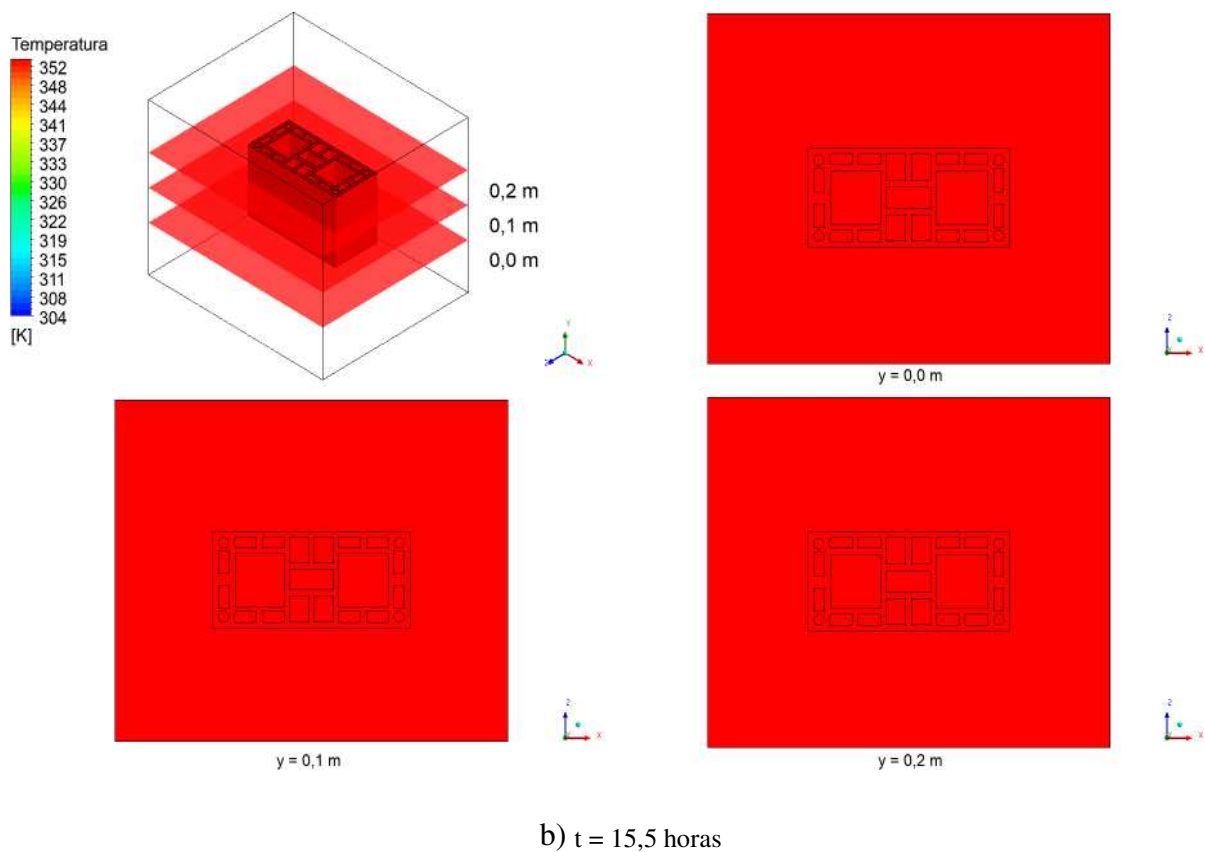
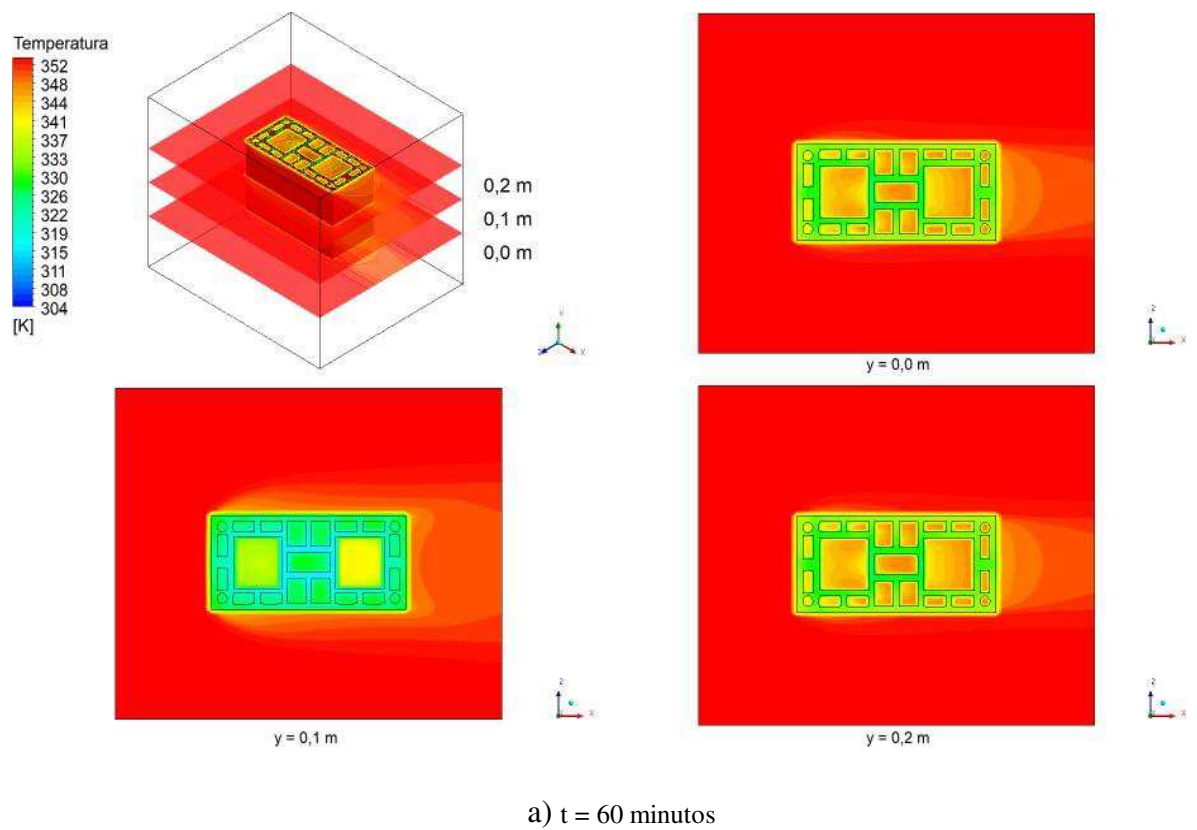


Figura 4.46 Distribuição de temperatura no ar e tijolo, em diferentes planos XZ nos tempos de secagem de (a) 60 min e (b) 15,5 horas ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).

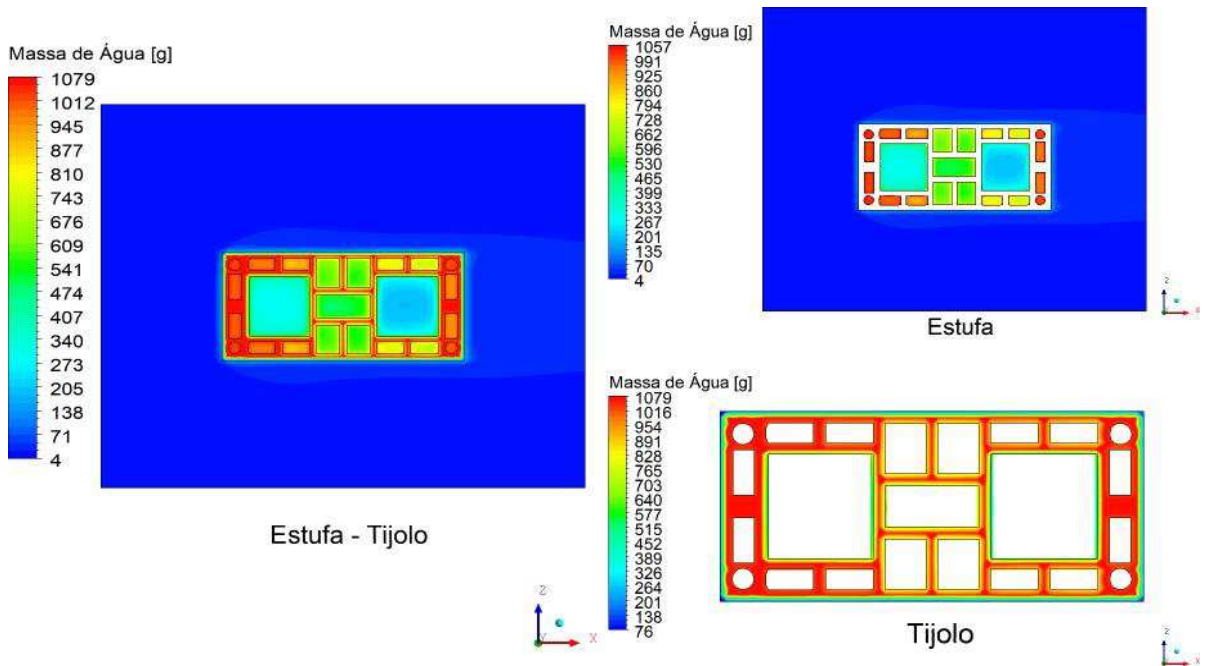


A obtenção de informações sobre como o teor de umidade é distribuído no interior e no contorno do sólido é importante, porque essas diferenças geram tensões que podem provocar danos ao produto, tais como trincas, fissuras ou deformações (Nascimento, 2002). Assim, foi analisada a distribuição da razão de umidade (teor de umidade adimensional) no sólido para algumas seções transversais em diferentes instantes de tempo escolhidos arbitrariamente.

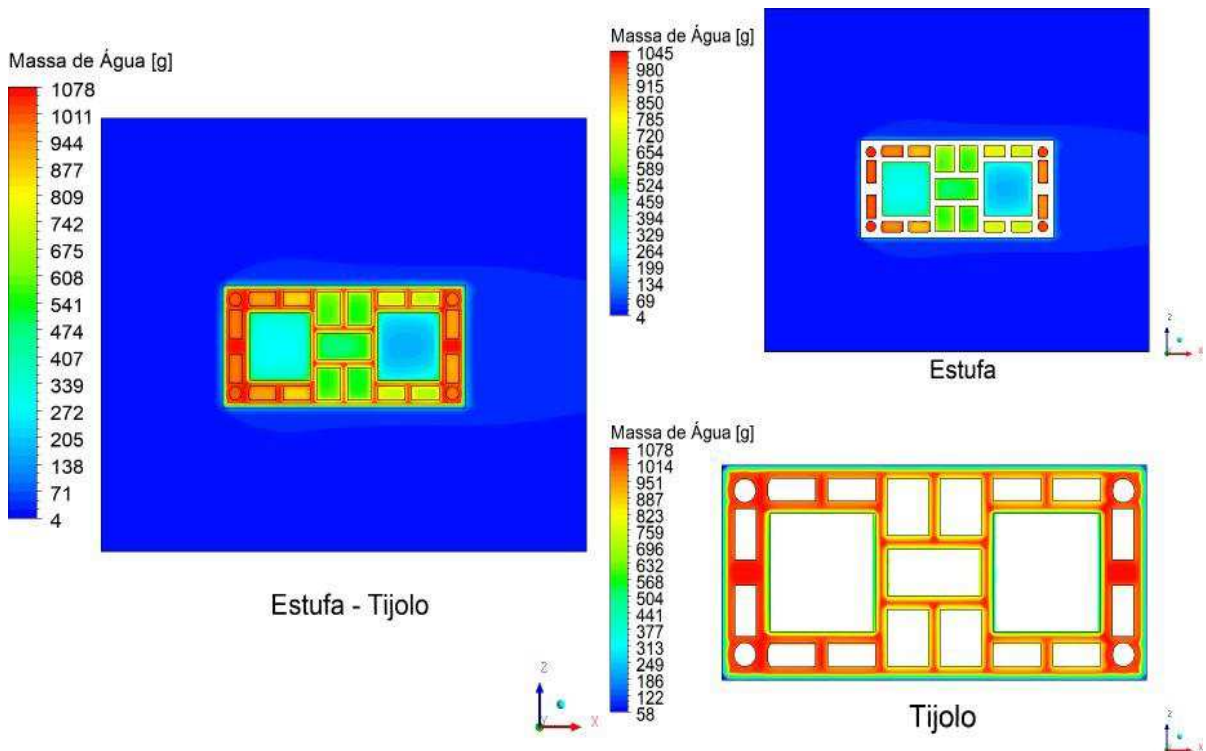
As Figuras 4.47 e 4.50 apresentam a distribuição de umidade no tijolo e ar, no plano XZ em $y = 0,1$ m, para os instantes de tempo $t = 10, 30$ e 60 minutos e $t = 15,5$ horas. A partir destas figuras, percebe-se que a região parede frontal do tijolo, ao ar de secagem, apresentam valores maiores de concentração de umidade, este fato pode ser explicado devido posicionamento do tijolo que conduz ao movimento do ar de secagem apresentar menores velocidades no interior dos furos do tijolo e, conseqüentemente, reduz a remoção de água e, assim, ocasionando o acúmulo de umidade na região dos primeiros furos. Este fato comprova que posicionamento do tijolo interfere no processo de secagem. Verifica-se ainda que a massa de água não é uniforme e não é simétrico dentro do tijolo, fato este também explicado pelo posição do tijolo dentro da estufa. Também é observado que as paredes centrais do material permanecem mais molhadas. Devido a condição imposta do fluxo na interface do tijolo, a massa de água que sai do material é transferida diretamente para o ar circundante, o qual pode ser visto através dos campos de massa de ar dentro da estufa.

Para avaliar os campos vetoriais da velocidade do ar de secagem no interior da estufa quando entra em contato com o tijolo ao longo do eixo Y, foi plotado o plano XZ em diferentes posições $y = 0$ m; $0,1$ m e $0,2$ m. Sobre cada plano foram representados os campos vetorial de velocidade e o de velocidade, conforme ilustra as Figuras 4.51 e 4.52, respectivamente. Observa-se, nos diferentes planos, que o ar de secagem é diretamente afetado pela presença do tijolo. Zonas de baixa velocidade são observadas ao logo do tijolo, enquanto que as zonas mais afastadas são onde se tem maiores velocidades. Os resultados indicam que as regiões que possuem maiores gradientes de velocidade são aquelas frontais a direção do fluxo. Possíveis zonas de recirculação podem ser observadas mais nitidamente através do campo vetorial ilustrado na Figura 4.51.

Figura 4.47 Distribuição de umidade no ar e tijolo, no plano XZ (Y = 0,1 m), nos tempos de a) t = 10 min e b) t = 30 min (T = 80°C, UR = 5%).

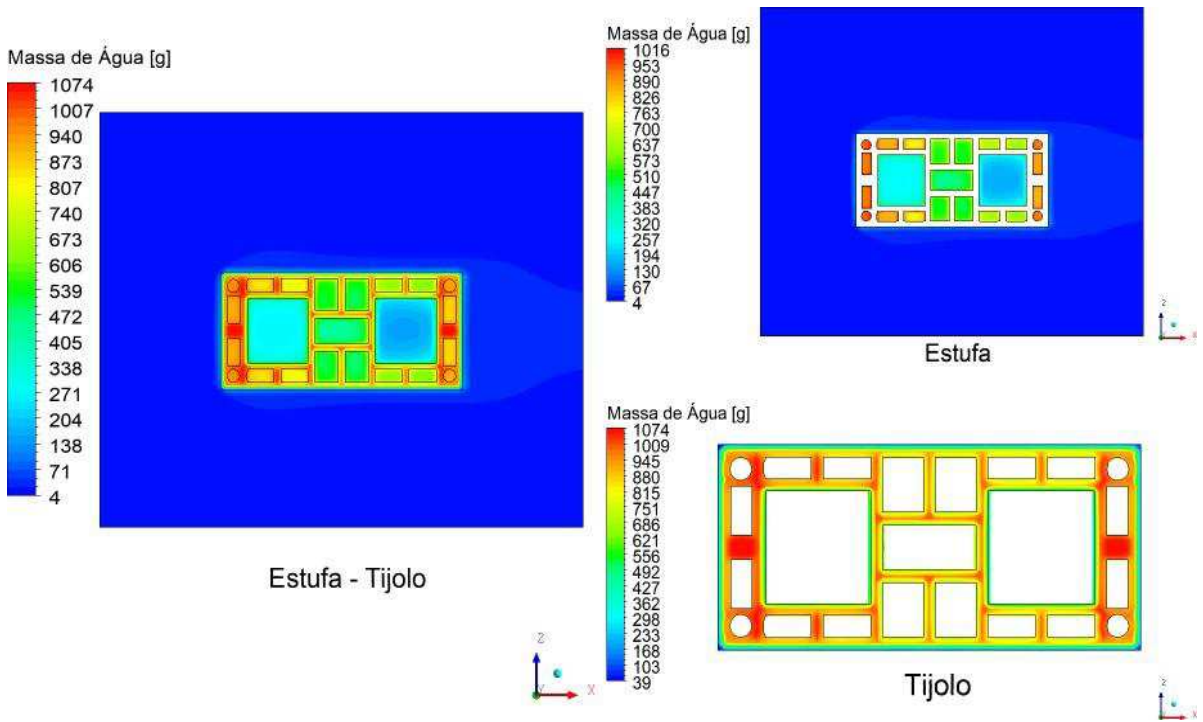


a) t = 10 minutos

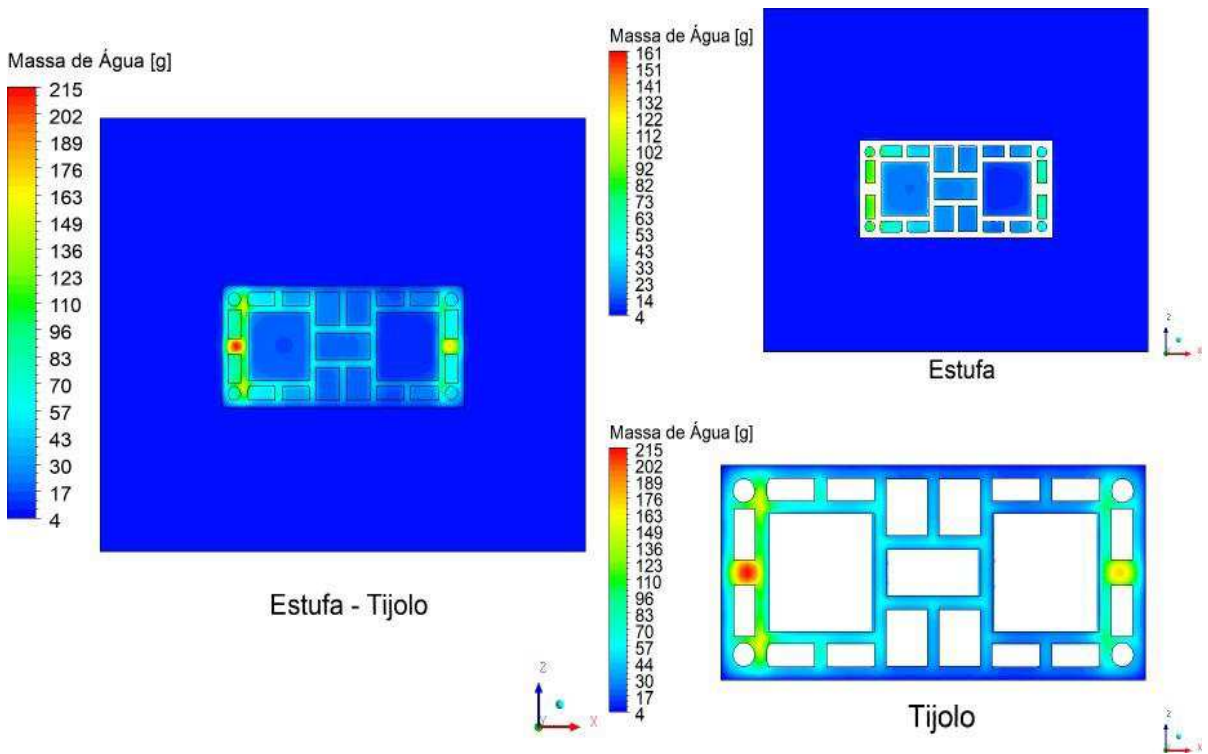


b) t = 30 minutos

Figura 4.48 Distribuição de umidade no ar e tijolo, em diferentes planos XZ ($y = 0,1 \text{ m}$), nos tempos de a) $t = 60 \text{ min}$ e b) $t = 15,5 \text{ horas}$ ($T = 80^\circ\text{C}$, $UR = 5\%$).



a) $t = 60 \text{ minutos}$



b) $t = 15,5 \text{ horas}$

Figura 4.49 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo, em diferentes planos XZ, nos instantes de a) $t = 10$ min e b) 30 min ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).

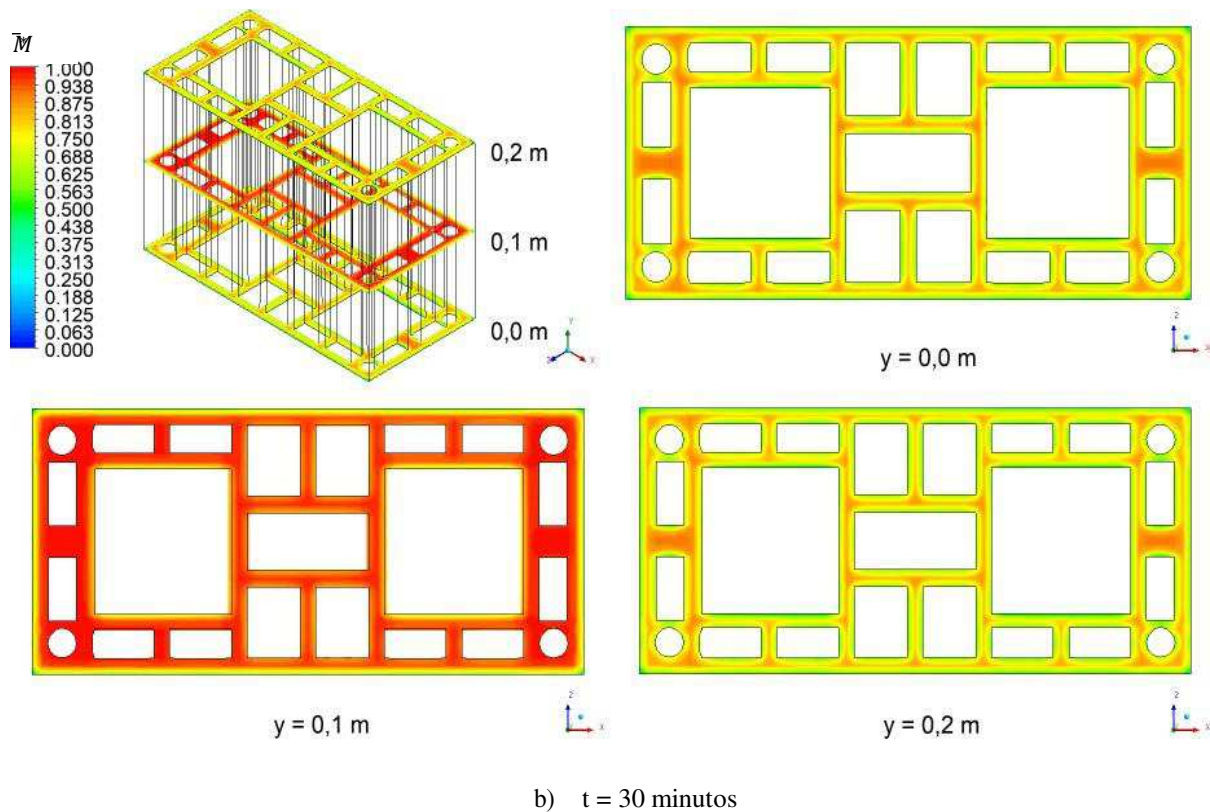
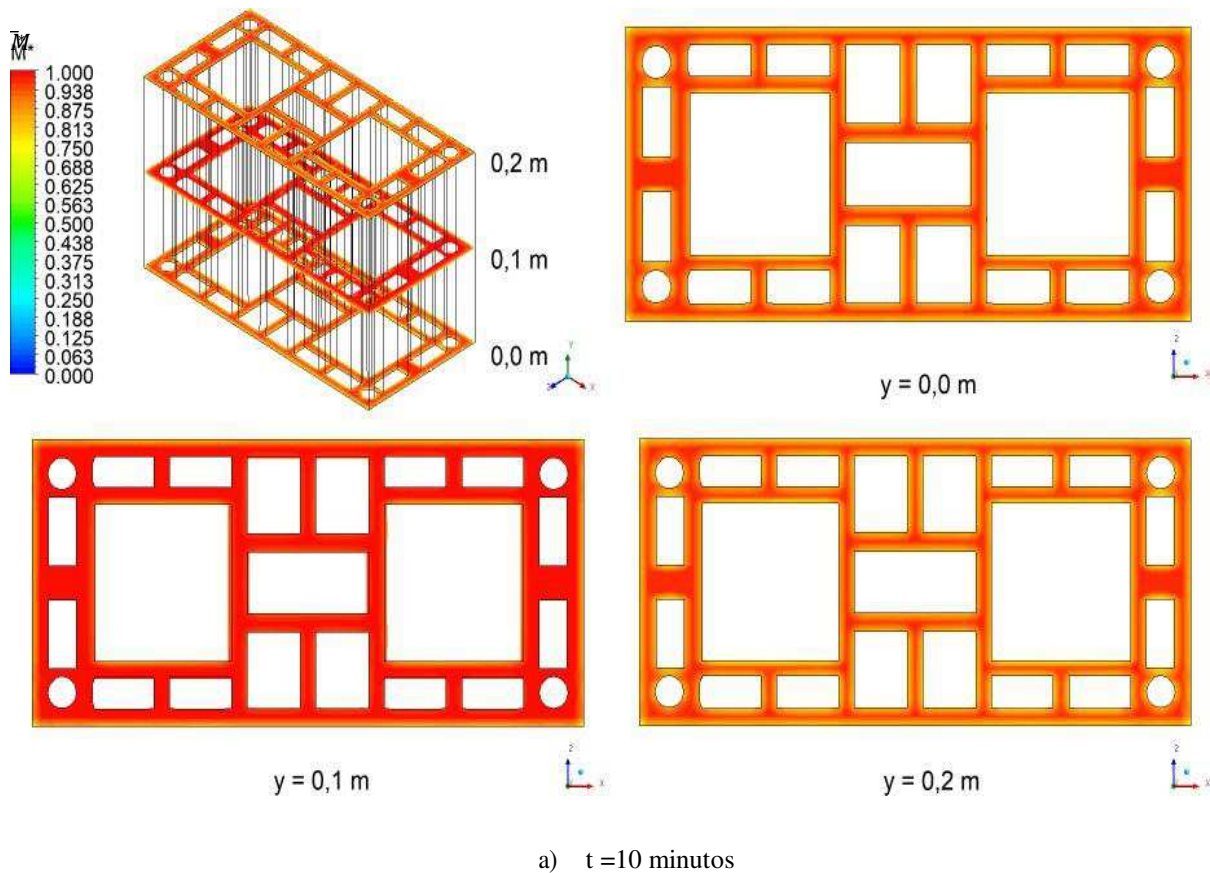
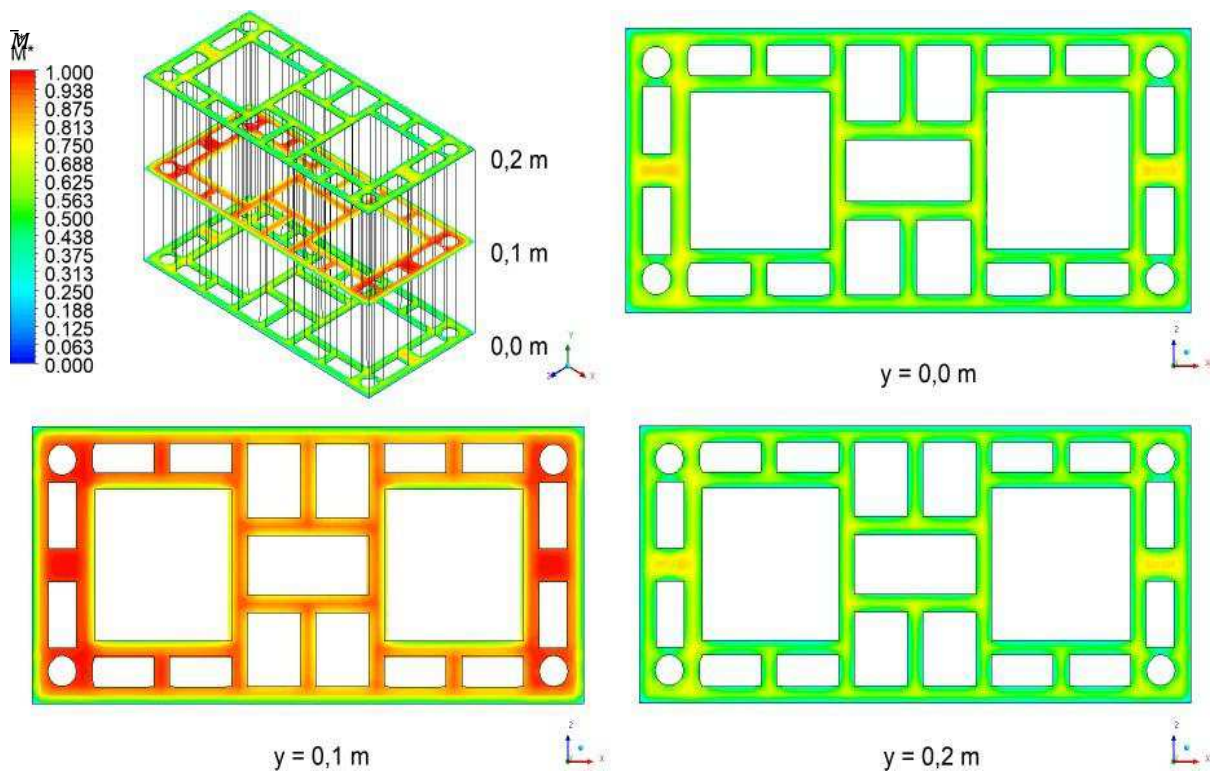
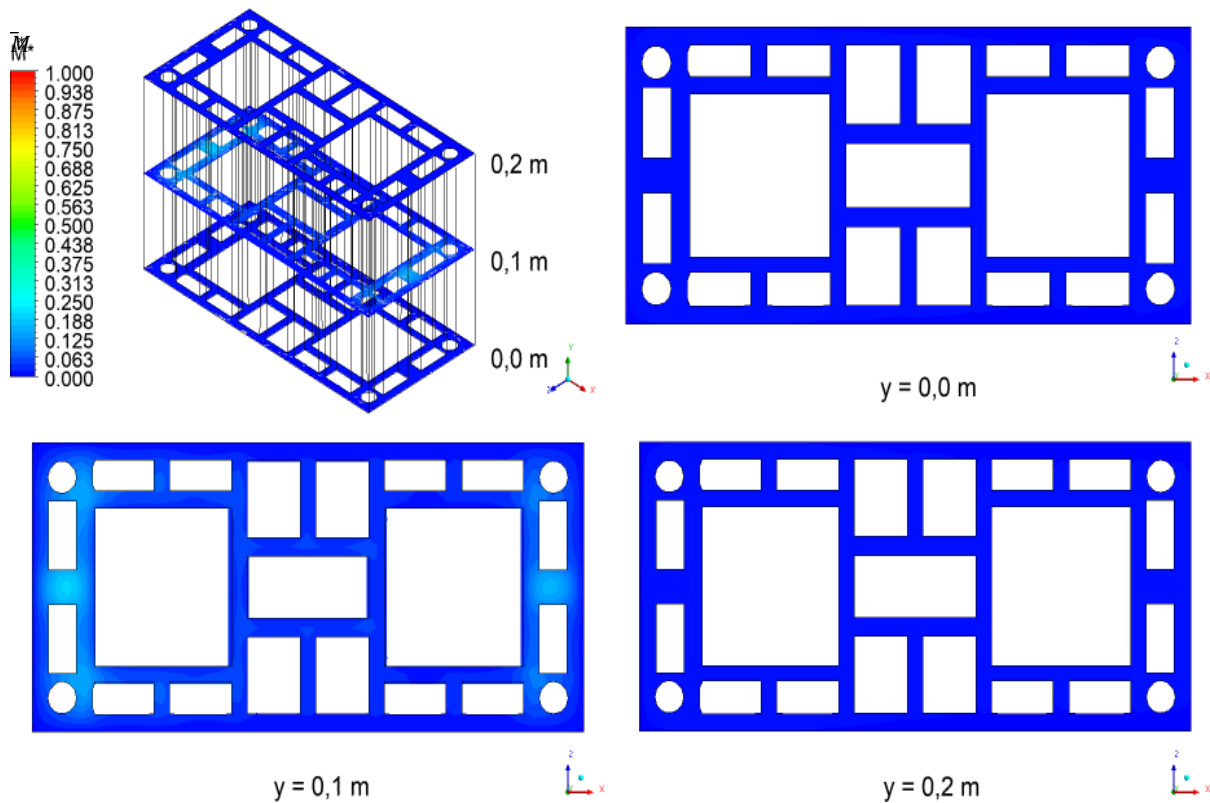


Figura 4.50 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo, em diferentes planos XZ, nos instantes de a) $t = 60$ min e b) 15,5 horas ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).

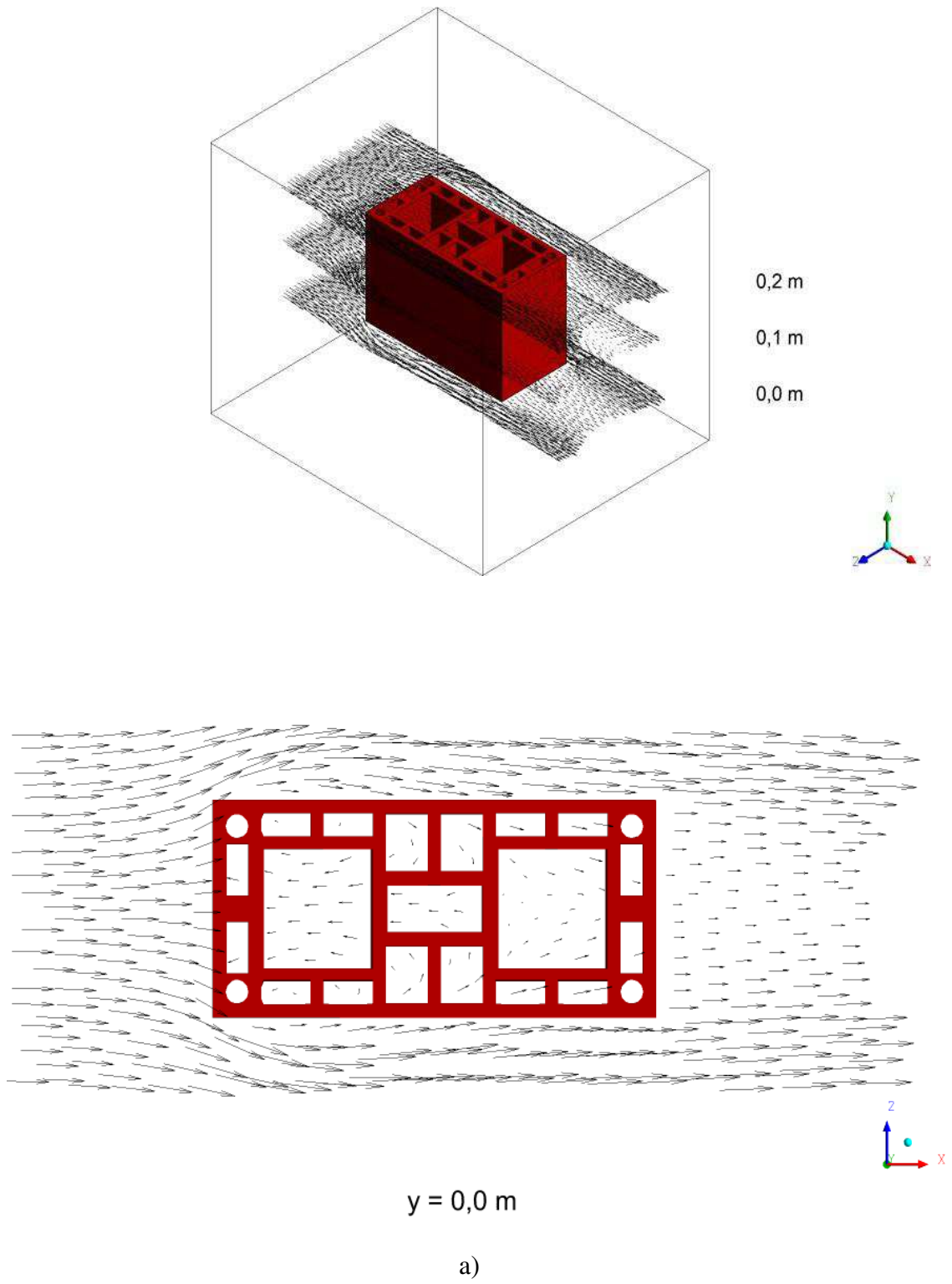


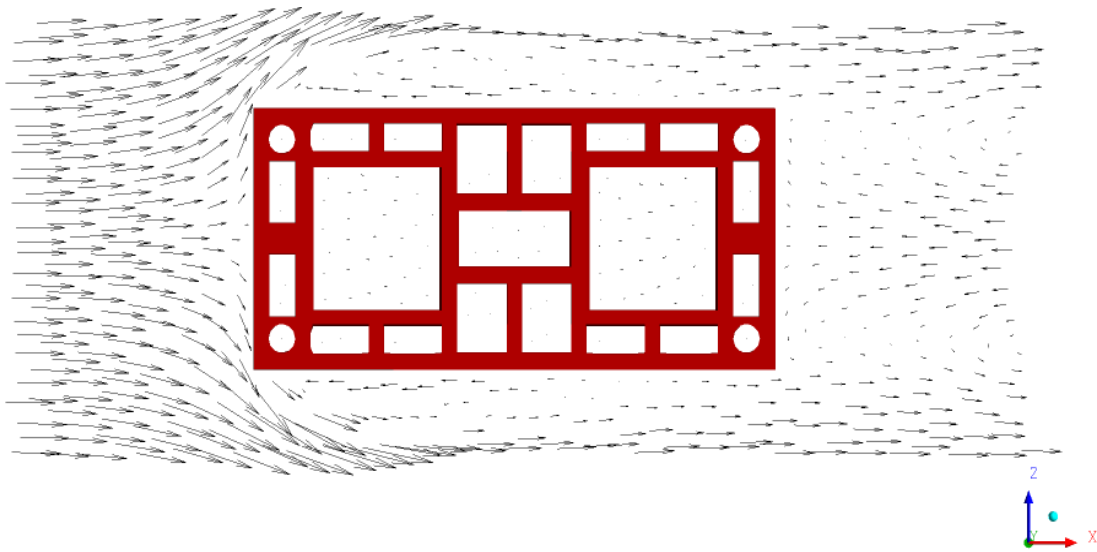
a) $t = 60$ minutos



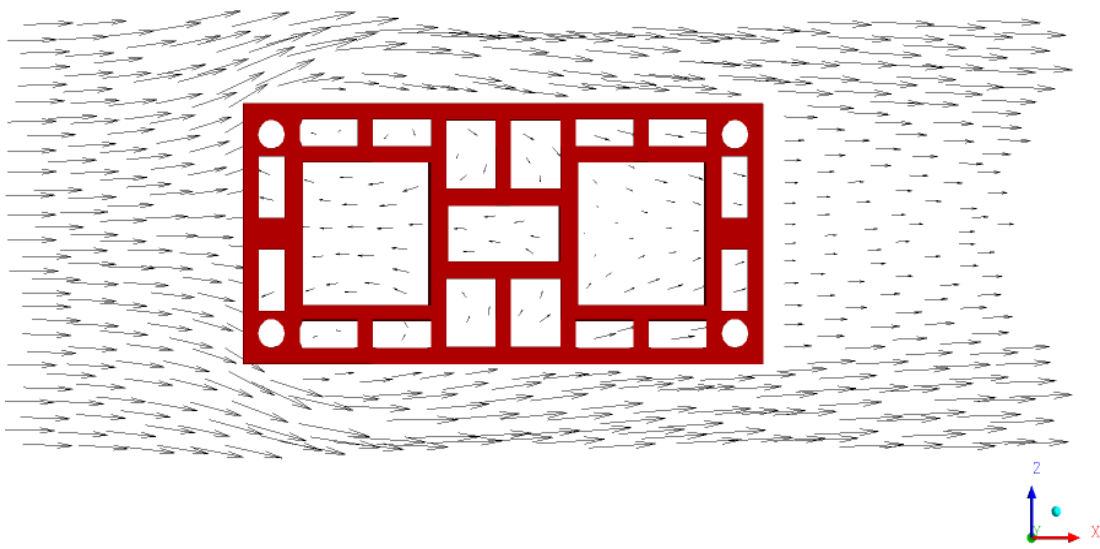
b) $t = 15,5$ horas

Figura 4.51 Campo vetorial da velocidade do ar em diferentes planos XZ nas posições (a) $Y = 0$ m, (b) $Y = 0,1$ m e (c) $Y = 0,2$ m ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $UR = 5\%$).



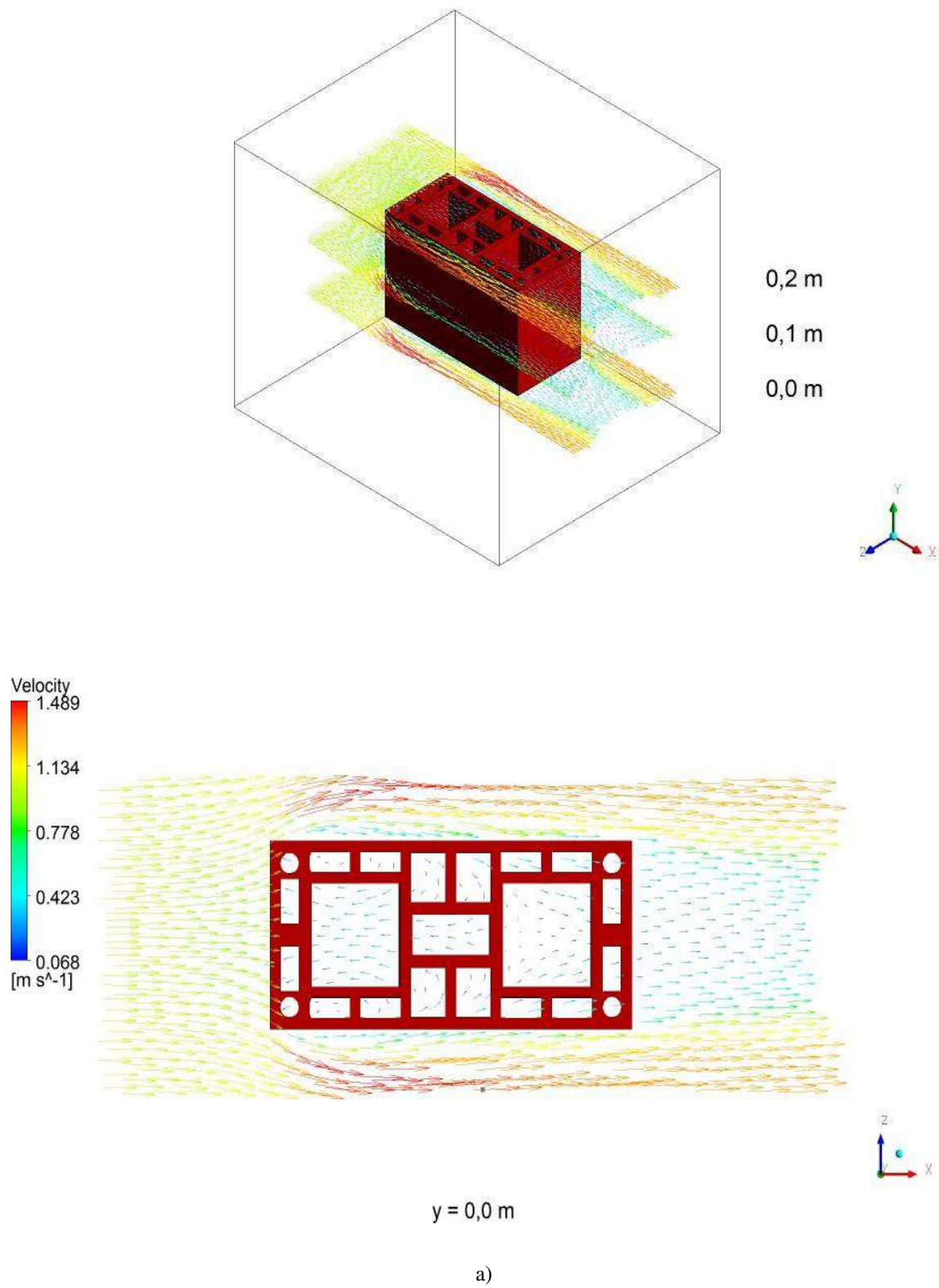


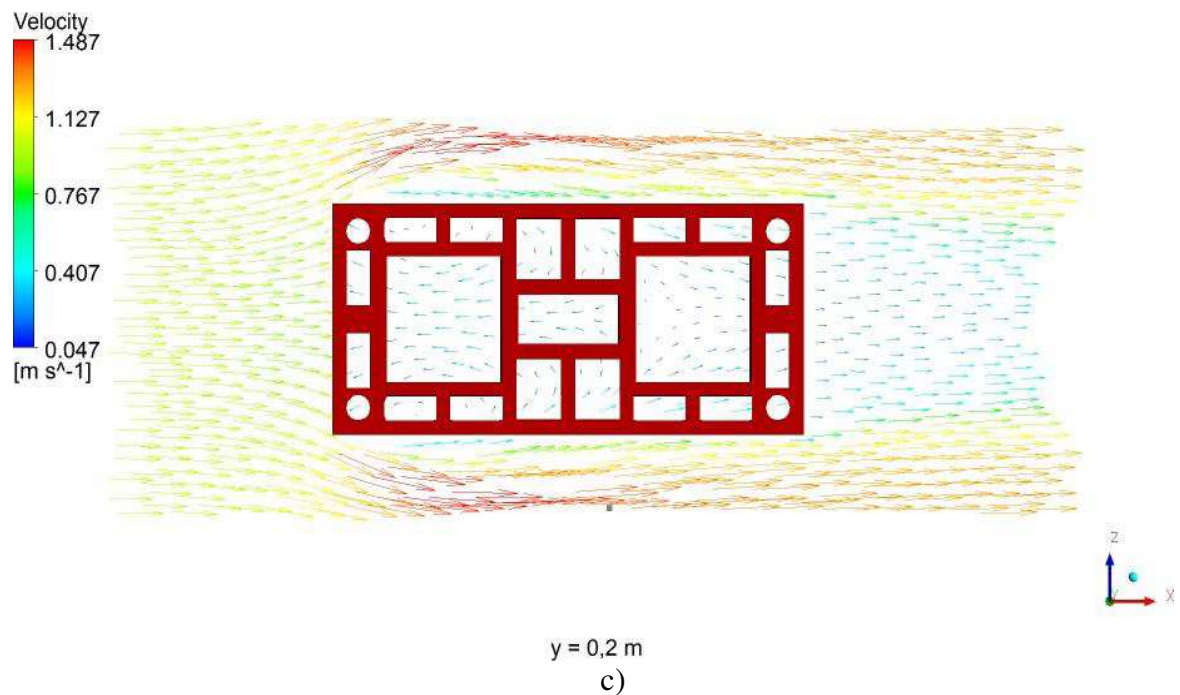
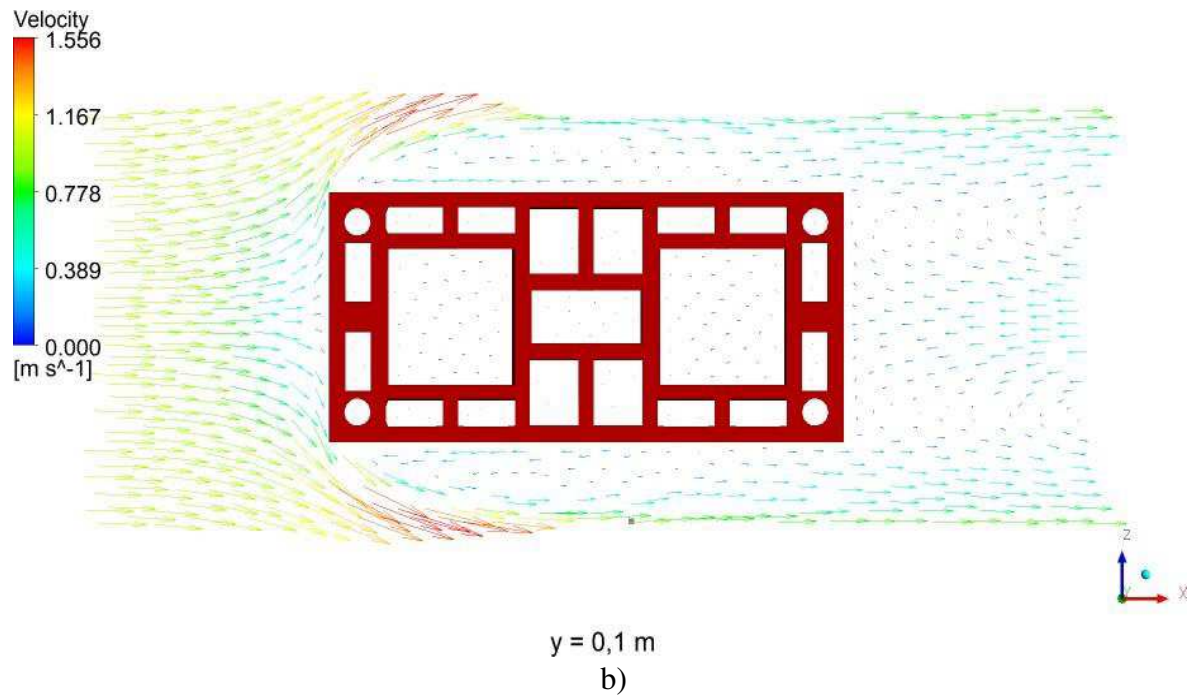
$y = 0,1 \text{ m}$
b)



$y = 0,2 \text{ m}$
c)

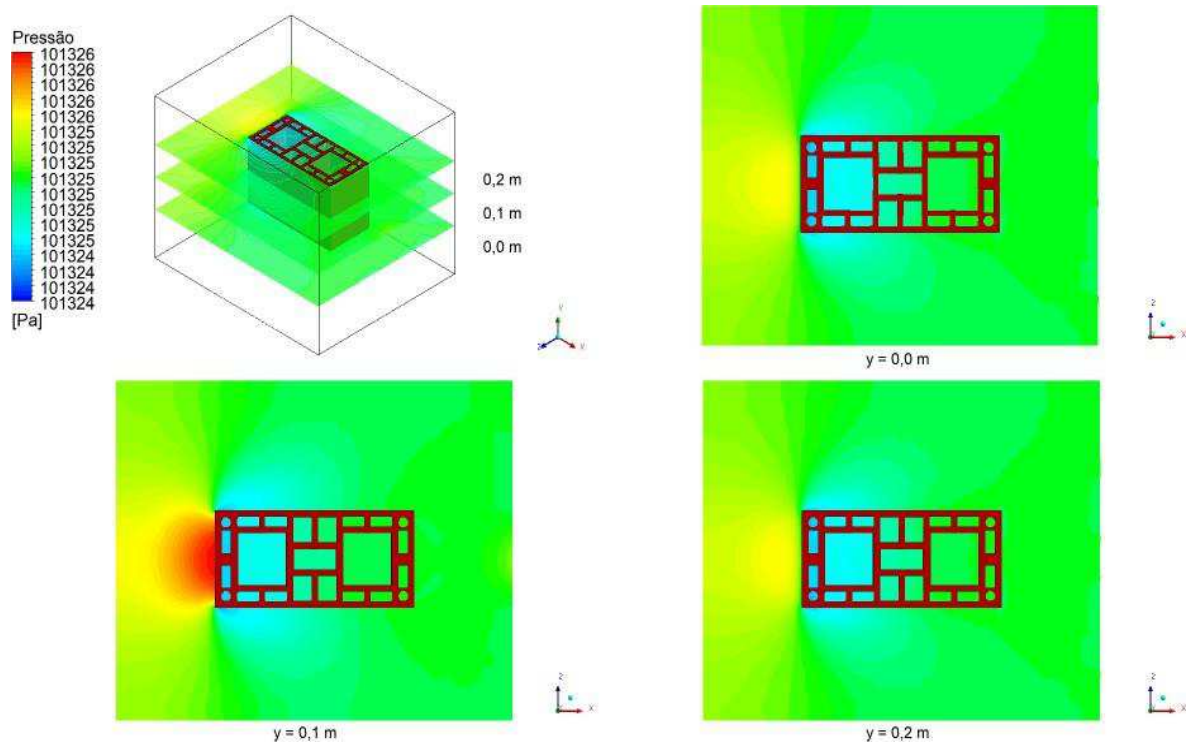
Figura 4.52 Campo de velocidade do ar em diferentes planos XZ nas posições (a) $Y = 0$ m, (b) $Y = 0,1$ m e (c) $Y = 0,2$ m ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $UR = 5\%$).



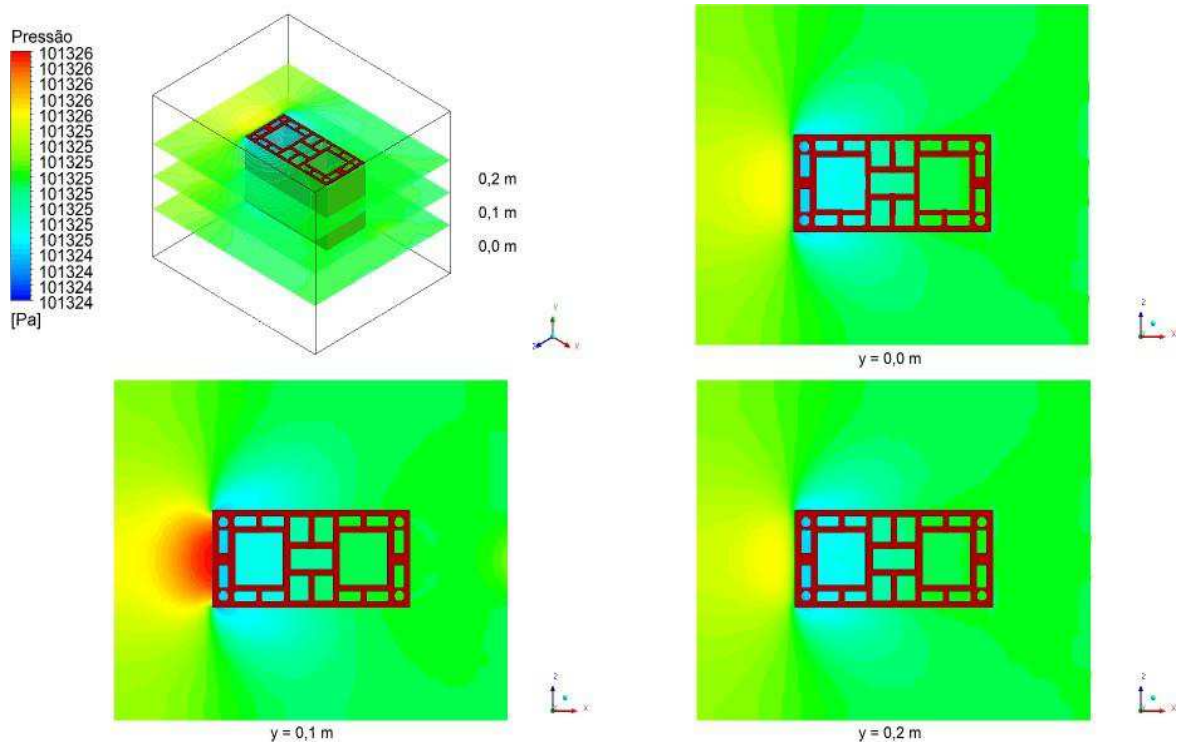


Nas Figuras 4.53 e 4.54 estão representados os campos de pressão nos planos longitudinal XZ, nas posições Y = 0,0 m; 0,1 m e 0,2 m, para diferentes tempos de processo (10, 30, 60 minutos e 15,5 h). Observa-se que os maiores gradientes de pressão ocorrem na região frontal à direção do fluxo, enquanto que, nos vértices da região frontal tem-se uma pressão menor. Obviamente o escoamento ocorre da esquerda para a direita.

Figura 4.53 Campos de pressão em diferentes planos XZ, nos instantes (a) $t = 10$ min e (b) $t = 30$ min ($T = 80^\circ\text{C}$, UR = 5%).

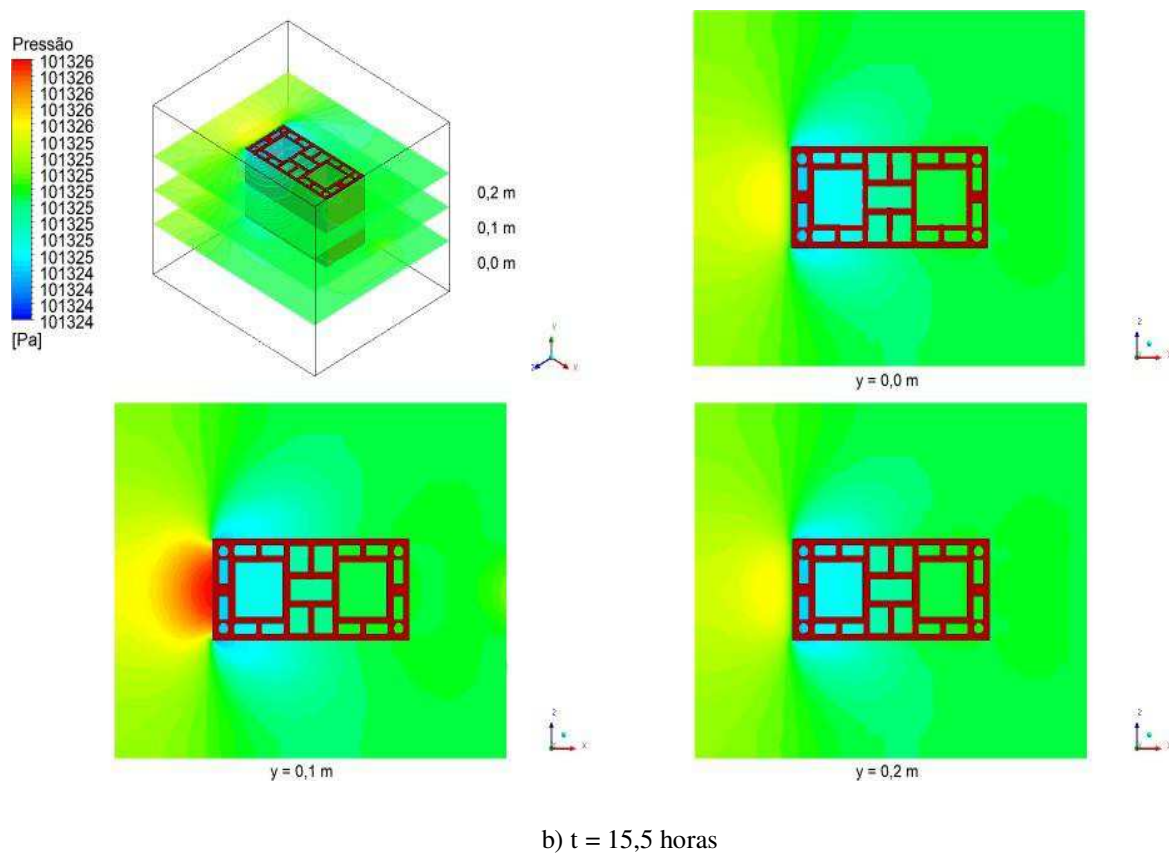
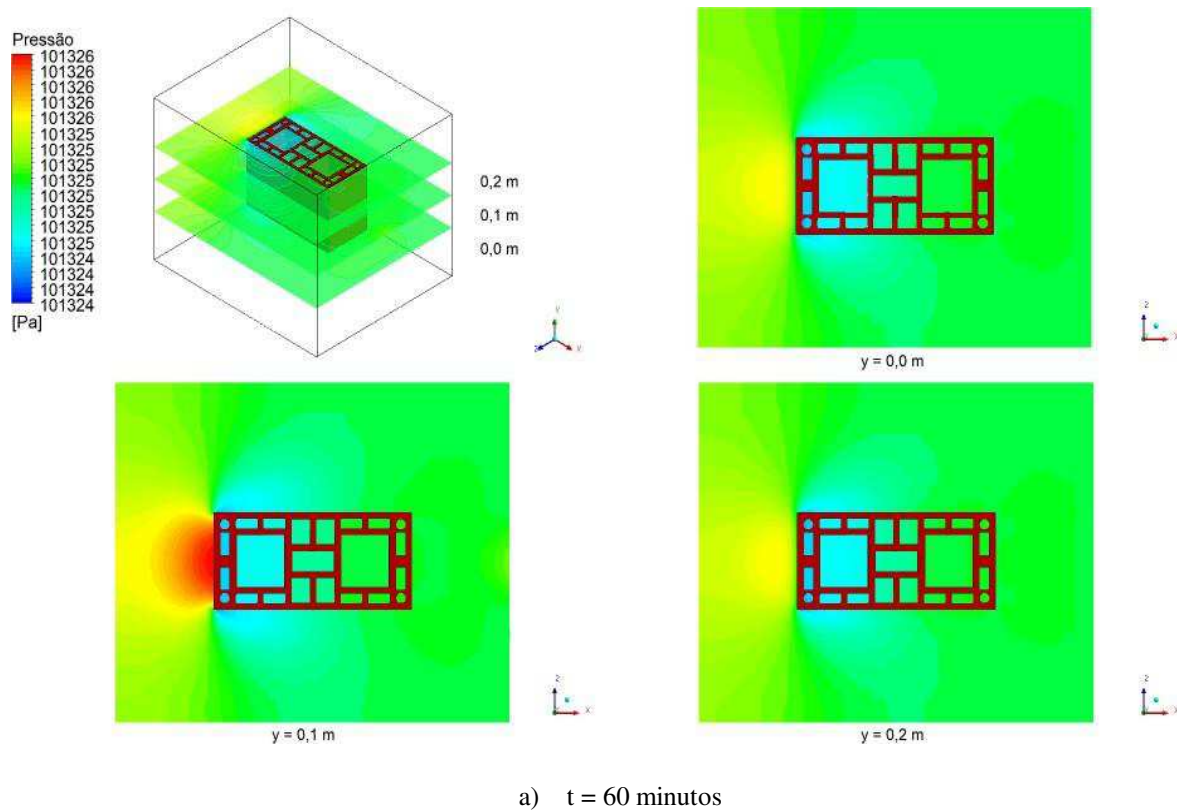


a) $t = 10$ minutos



b) $t = 30$ minutos

Figura 4.54 Campos de pressão em diferentes planos XZ, nos instantes (a) $t = 60$ min e (b) $t = 15,5$ horas ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).



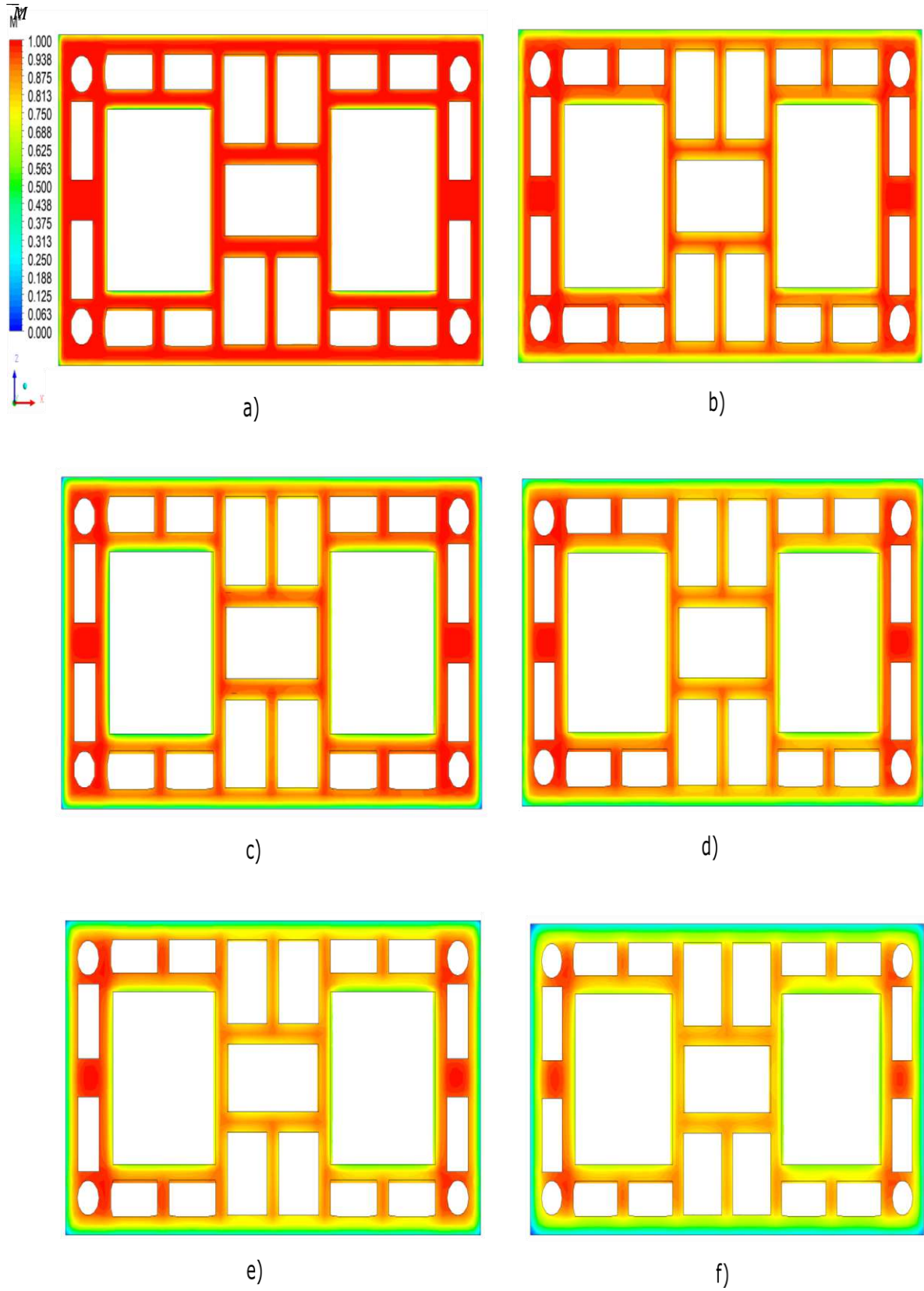
Para analisar a influência da temperatura no processo de secagem do tijolo em estufa, foi considerado um instante $t = 60$ minutos e plotado no plano XZ ($Y = 0.1$ m), a distribuição do teor de umidade para todas as temperaturas do ar de secagem estabelecidas nesta pesquisa.

A partir da Figura 4.55, onde é representado o campo do teor de umidade sobre o plano XZ em $Y = 0,1$ m, pode-se verificar que, como esperado, o tijolo seca mais rapidamente à medida que a temperatura do ar de secagem cresce. Para 100°C , por exemplo, o plano central já está parcialmente seco em $t = 60$ min, enquanto que para a temperatura de 50°C verifica-se uma quantidade considerável de umidade, principalmente no interior do tijolo corroborando com a teoria que a perda de umidade ocorre do interior para superfície do tijolo e o fluxo de calor se dá de fora para dentro do material.

Percebeu-se ainda que, para os diferentes casos simulados, a temperatura tem forte influência na difusividade de massa, ou seja, a medida que a temperatura aumenta a difusividade também aumenta.

O aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumentam a taxa de secagem e o tijolo alcança mais rapidamente a temperatura e sua umidade de equilíbrio. Não são aconselháveis altos gradientes térmicos e hídricos ao longo do tijolo porque isto produz uma secagem não uniforme e grandes tensões térmica, hídrica e mecânica no tijolo, o que pode causar rachaduras, fissuras, deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo, e conseqüentemente inviabilizando a sua comercialização. É de grande importância uma secagem prévia, controlada. Se a secagem não for uniforme, certamente aparecerão distorções nas peças, por outro lado se for muito lenta, tornará o processo produtivo antieconômico (Nascimento, 2002).

Figura 4.55 Distribuição do teor de umidade adimensional no plano xz em $y=0,1$ m, em $t = 60$ min, para as temperaturas do ar de secagem: (a) 50°C , (b) 60°C , (c) 70°C , (d) 80°C , (e) 90°C e (f) 100°C .



4.2.3 Estudo comparativo entre os problemas físicos considerados

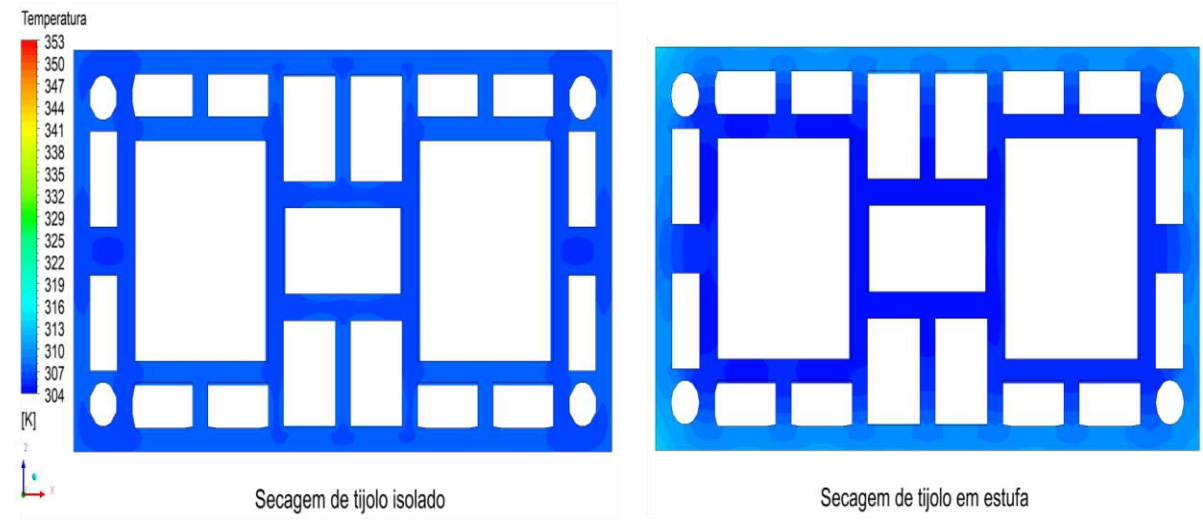
As Figuras 4.56 e 4.57 apresentam os campos de temperatura e teor de umidade sobre o plano XZ ($Y = 0,1$ m) nos instantes 10, 30, 60 minutos e 15,5 horas sobre o tijolo considerando isoladamente e na estufa.

A Figura 4.57 indica, de uma maneira geral, que os resultados da simulação numérica da secagem do tijolo compensador, na qual foi adotado condições de contorno prescritas nas faces do tijolo, secam mais rápido do que a situação de secagem em estufa. Isto é devido à condição de equilíbrio assumida na superfície do sólido e que corresponde a um caso particular em que se tem um coeficiente de transferência de massa suficientemente grande. Isto acelera o processo de secagem e provoca o rápido aparecimento de grandes regiões elásticas na superfície, enquanto que o centro continua plástico, provocando o aparecimento de tensões trativas nos vértices do sólido e compressivas na superfície. Este fato também foi verificado por Nascimento (2002), Hasatani e Itaya (1992). Observa-se ainda, que nas regiões próximas dos vértices, a secagem ocorre de maneira mais rápida. Fisicamente isto é esperado, uma vez que tende a variar mais rapidamente o valor do teor de umidade nessas regiões em todos os planos e em qualquer tempo.

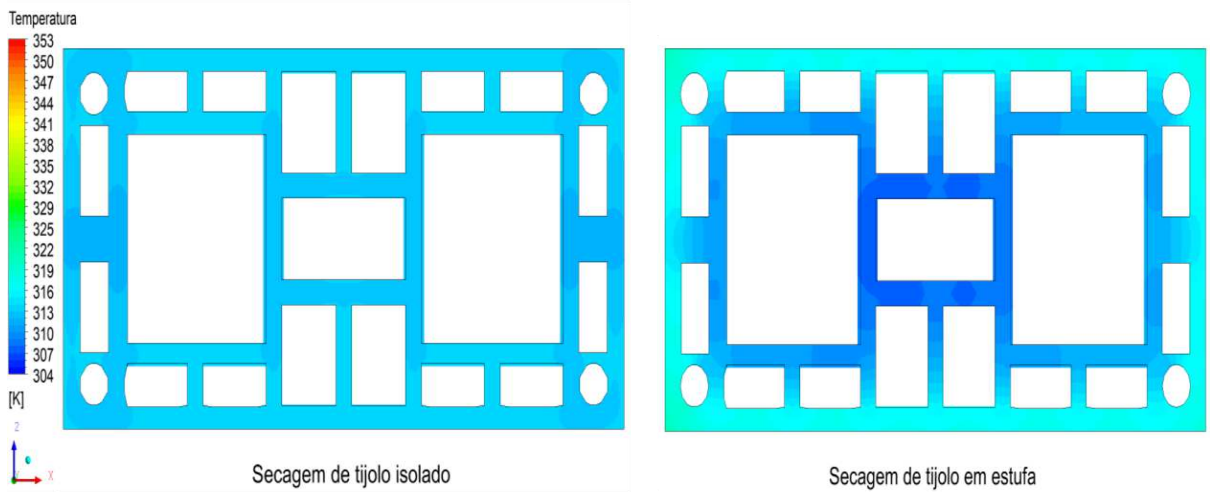
Analisando estas figuras pode-se observar algumas diferenças entre os resultados obtidos, em quase todos os tempos do processo de secagem. Estas diferenças deram-se principalmente por:

- a) Geometria adotada;
- b) Condições de contorno na superfície do tijolo;
- c) Modelagem matemática adotada.

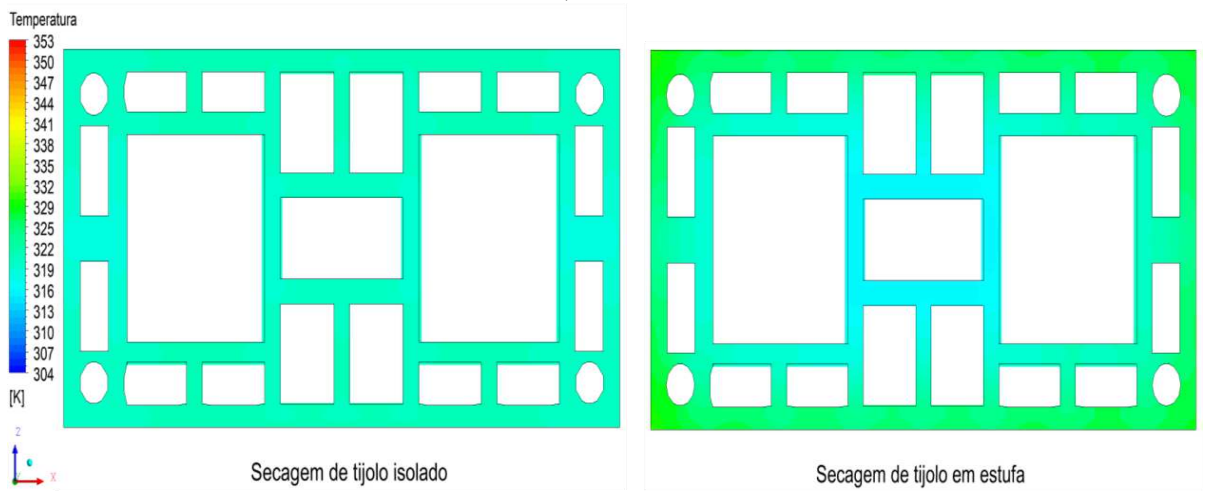
Figura 4. 56 Distribuição de temperatura, no plano XZ (Y = 0,1 m), sobre tijolo isolado e tijolo na estufa, em diferentes tempos do processo (T = 80°C, UR = 5%).



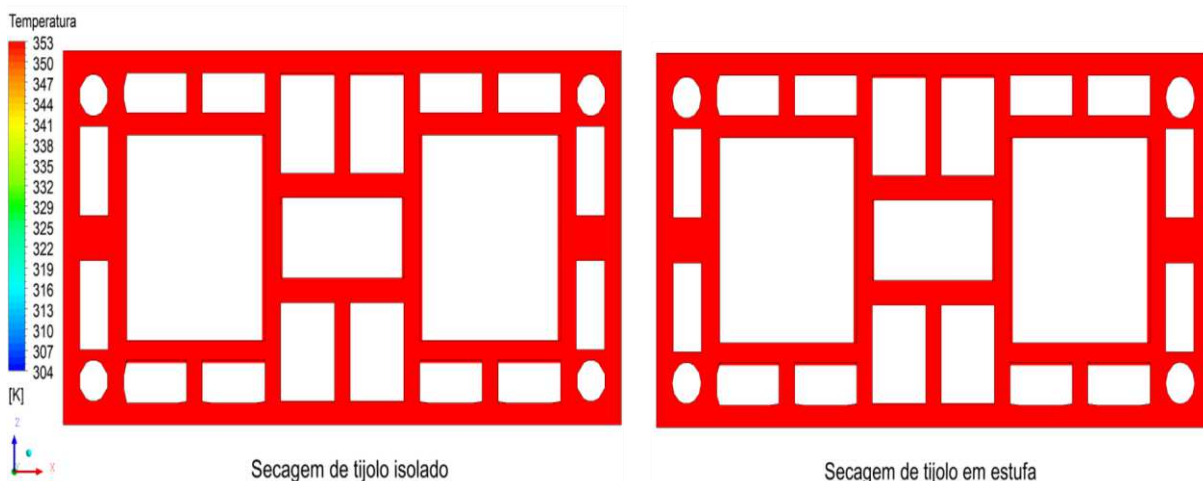
a) t = 10 minutos



b) t = 30 minutos

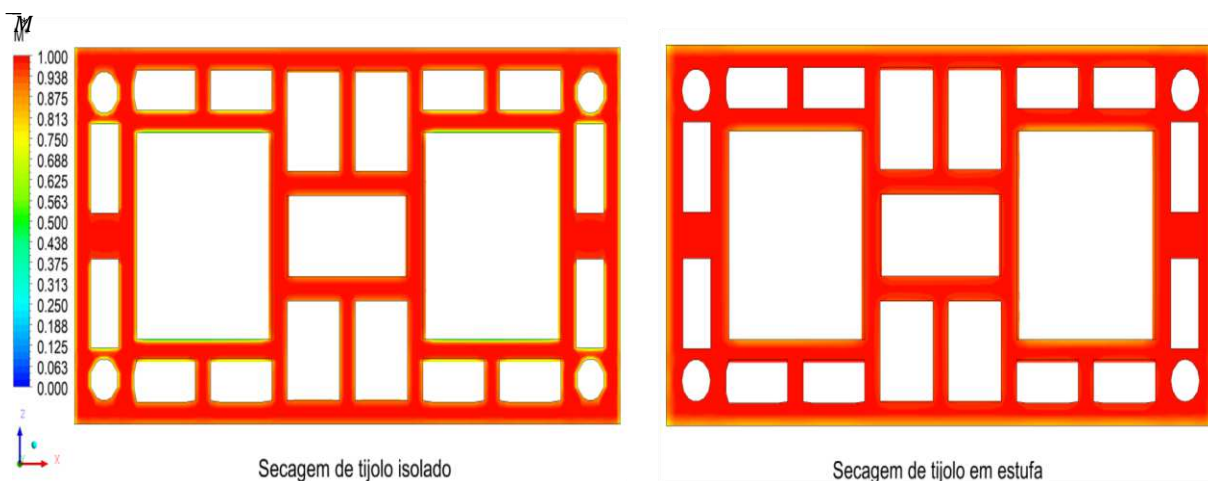


c) t = 60 minutos

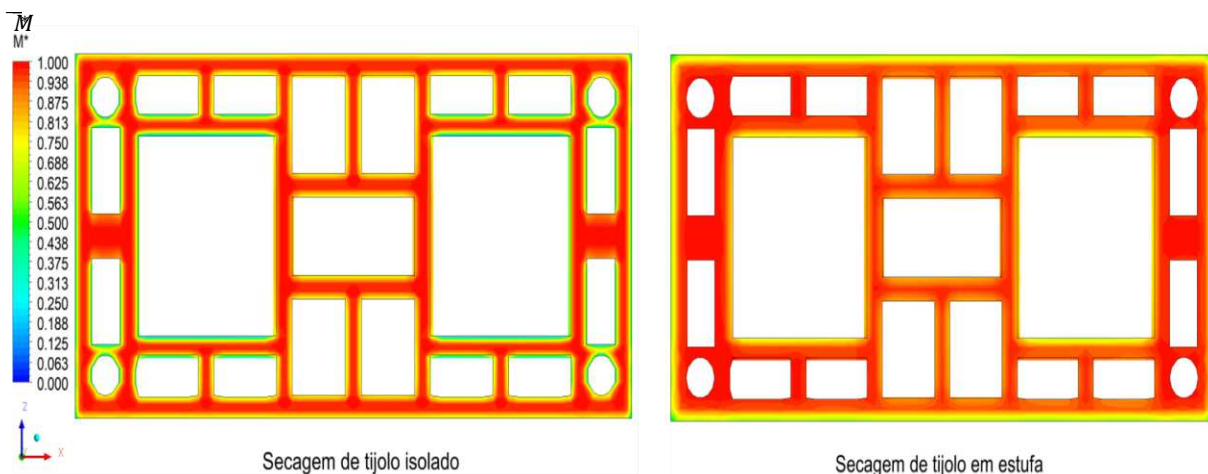


d) $t = 15,5$ horas

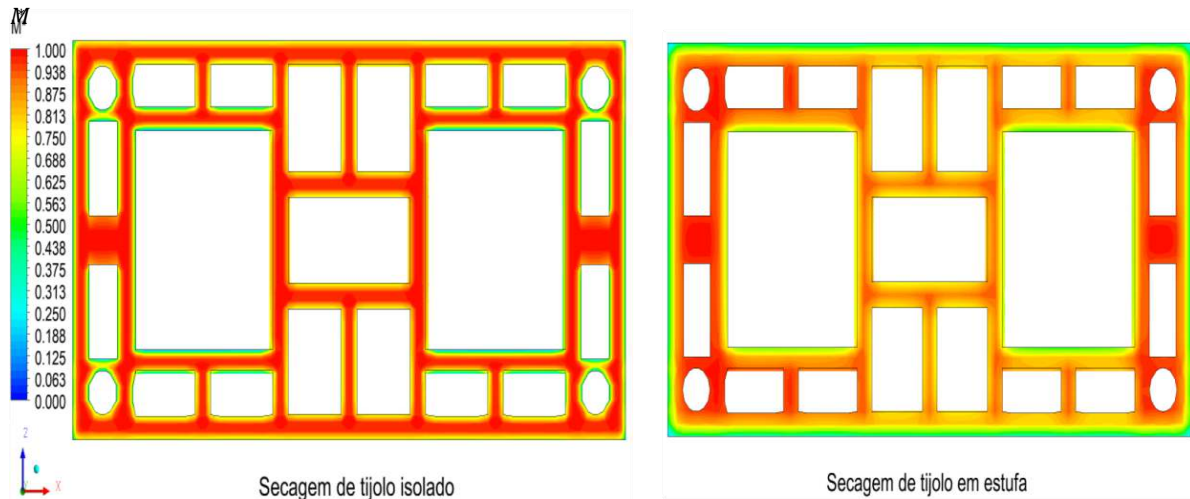
Figura 4.57 Distribuição do teor de umidade, no plano XZ ($Y = 0,1$ m), sobre tijolo isolado e tijolo na estufa, em diferentes tempos de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $UR = 5\%$).



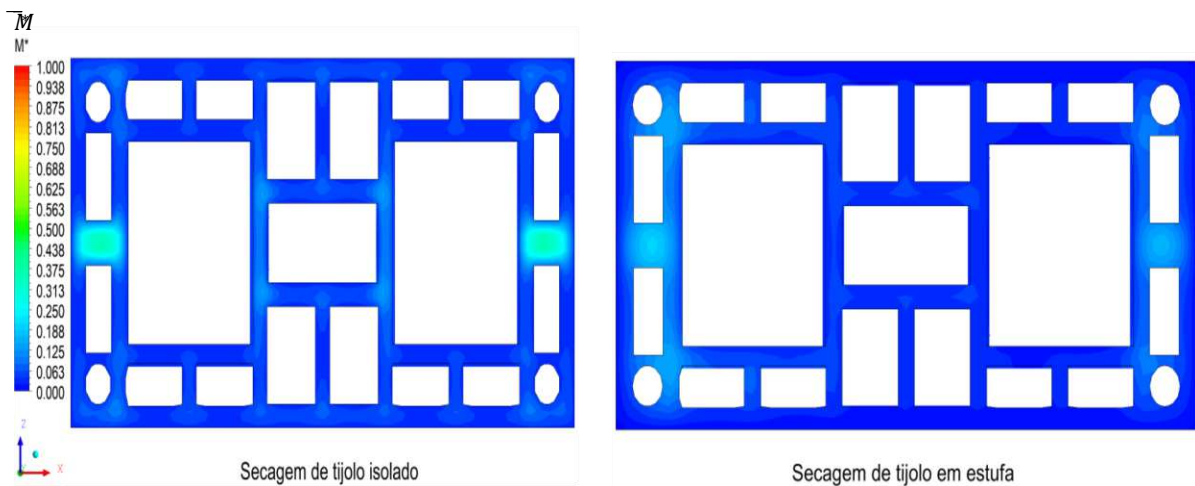
a) $t = 10$ minutos



b) $t = 30$ minutos



c) $t = 60$ minutos

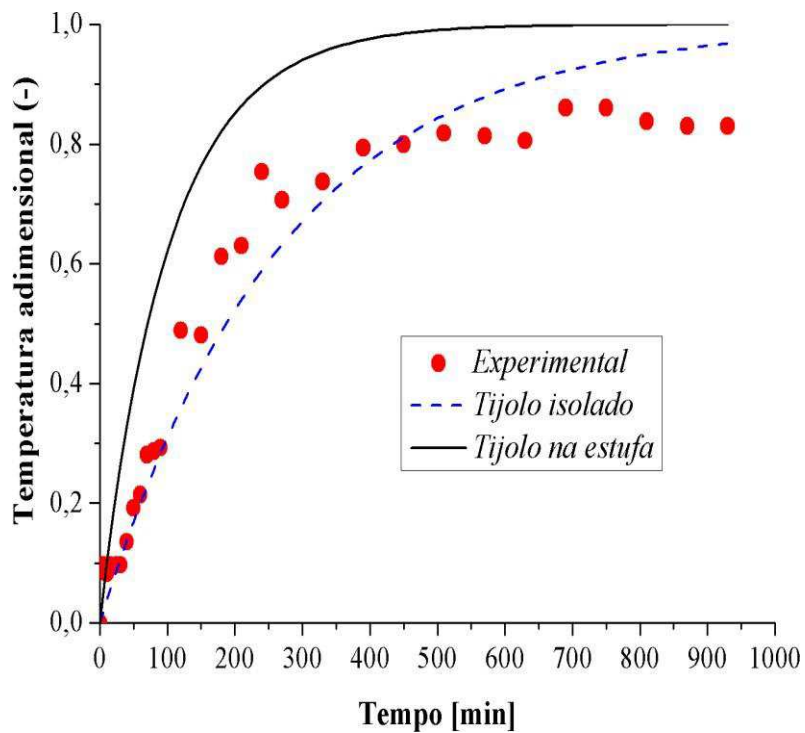


d) $t = 15,5$ horas

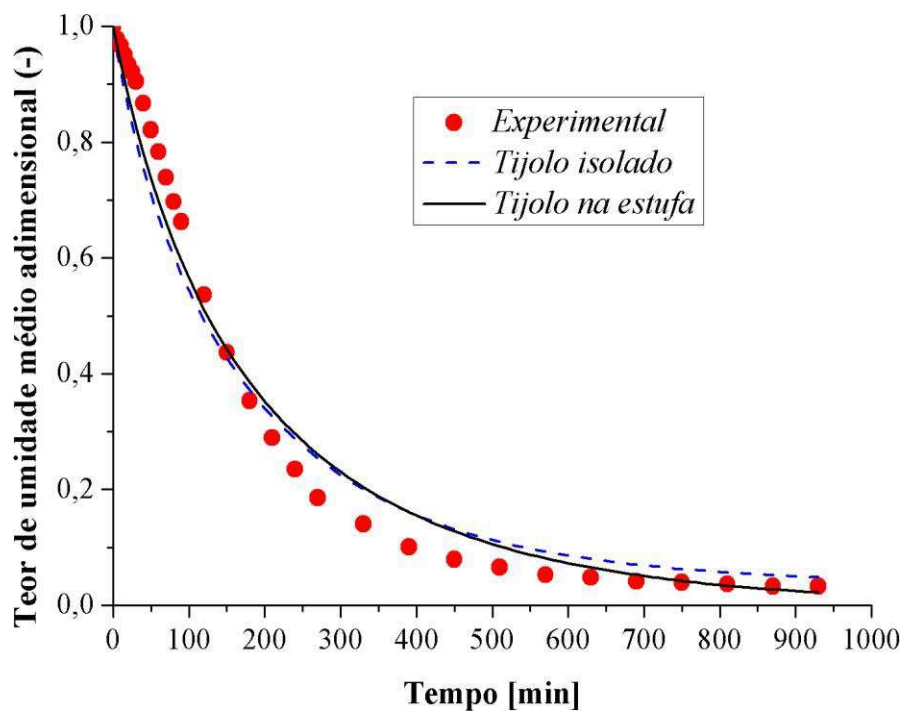
Para avaliar o comportamento da temperatura e teor de umidade durante a secagem do tijolo com e sem a consideração do meio externo ao longo do tempo, foram plotados os gráficos comparativos entre os dados experimentais e numéricos conforme ilustrado na Figura 4.58.

Após análise dessas figuras, verificou-se que a secagem, considerando o tijolo isolado, aquece mais rápido comparado ao caso com estufa. Isso pode ser justificado pelas condições de contorno impostas no estudo, principalmente na região dos furos, onde a velocidade do ar é praticamente nula, o que reduz consideravelmente o aquecimento nessa região.

Figura 4.58 Perfis de temperatura e teor de umidade adimensional no tijolo considerando isoladamente e na estufa ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $\text{UR} = 5\%$).



a)



b)

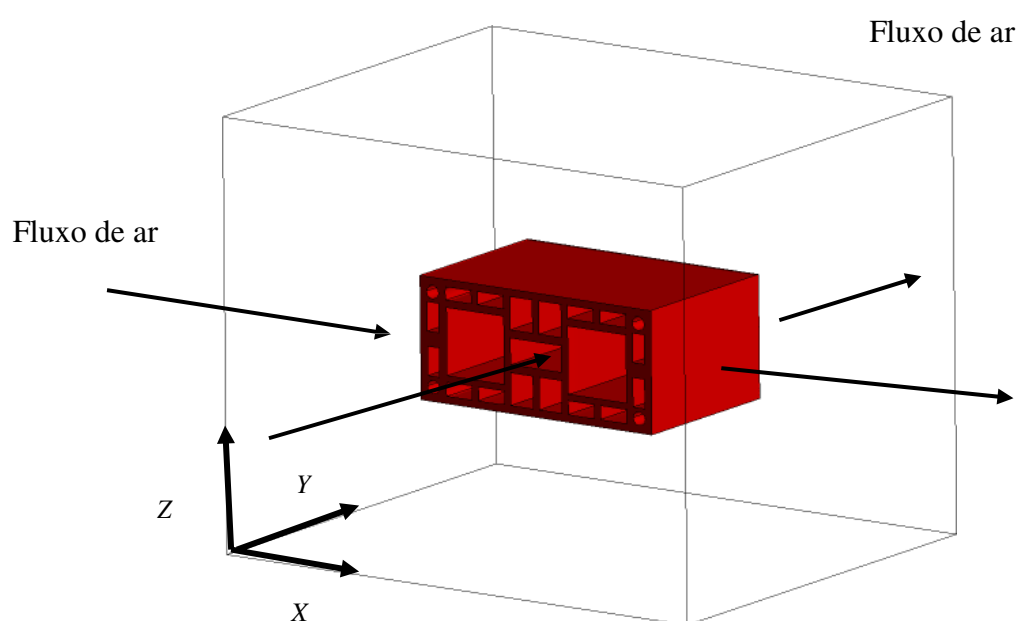
De acordo com a Figura 4.58 (b), verifica-se nos primeiros minutos do processo de secagem valores menores na razão de umidade para os dois casos analisados, sendo que no final da secagem ocorre uma inversão desses resultados. O que justifica o primeiro caso é devido a consideração do fenômeno do coeficiente de difusão constante, condição de contorno de equilíbrio e a ausência de encolhimento. O segundo caso, justifica-se devido à consideração feita de uma condição de contorno convectiva na superfície do sólido durante o processo de secagem. Portanto, ao se usar o modelo do primeiro caso para se estimar propriedades de transporte deve-se ter em mente que os resultados obtidos não são muito confiáveis, a exceção se dá caso a condição de contorno realmente estiver próxima do equilíbrio.

Diante do exposto, verifica-se que o modelo de difusão líquida bem descreve o fenômeno de secagem nos dois casos, porém o modelo de difusão líquida acoplada a convecção forçada é o modelo mais aconselhável do ponto de vista físico e matemático.

4.2.4 Influência da direção de fluxo no processo de secagem.

Nesta seção é discutido a influência da direção do fluxo de ar de secagem, no caso em que a secagem do tijolo ocorre na estufa (Figura 4.59). Para este estudo foram simulados os casos considerados duas direções para o fluxo de ar separadamente, a direção x e a direção y, sobre a qual foram analisadas as variáveis temperatura e teor de umidade.

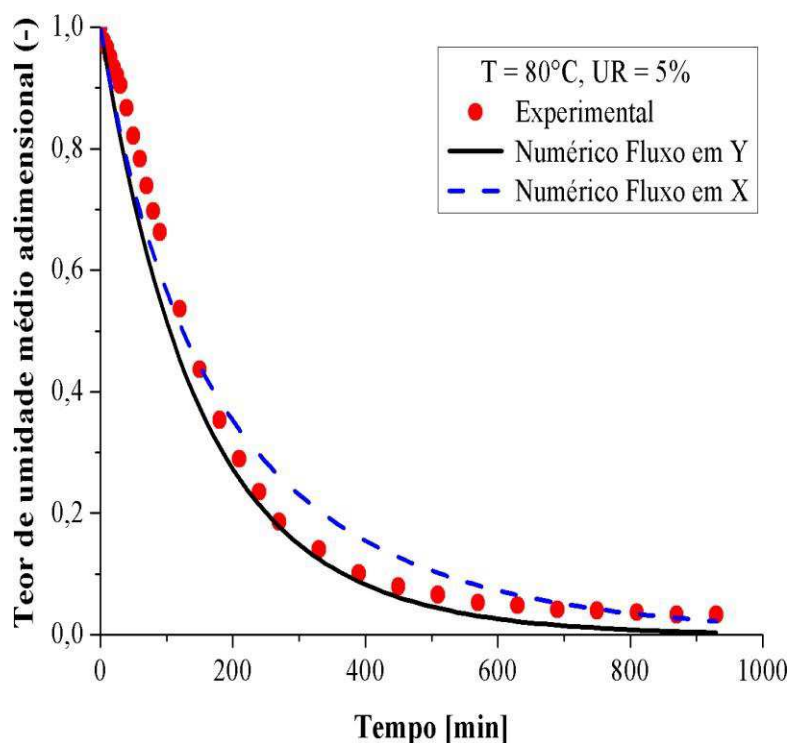
Figura 4.59 Ilustração das direções do fluxo de ar na estufa – tijolo.



A Figura 4.60 ilustra a comparação entre os resultados numéricos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo de secagem de tijolos cerâmicos estruturais na temperatura de 80°C, referente ao caso secagem em estufa.

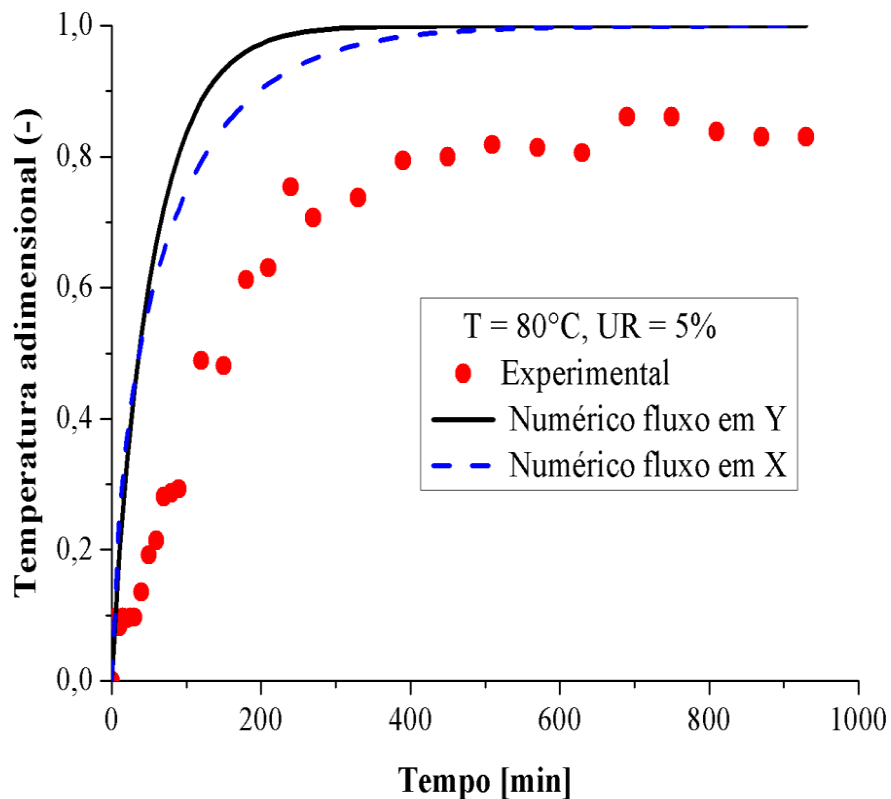
Como pode ser visto na Figura 4.60 os resultados numérico e experimental estão praticamente superpostos quando considerado o fluxo na direção y, enquanto que na direção x tem-se uma pequena discrepância. Para a direção x obtive-se um coeficiente de difusão de massa equivalente a $D = 32 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ e um erro médio quadrático correspondente a $0,07455117 \text{ (kg/kg)}^2$, e para a direção y igual a $D = 20 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ e um erro médio quadrático correspondente a $0,1054541 \text{ (kg/kg)}^2$, estes valores são justificados devido a posição do tijolo na estufa. Apesar da pequena discrepância observada, os resultados para os dois casos, indicam que o ajuste foi satisfatório.

Figura 4.60 Comparação entre o resultado numérico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem.



A Figura 4.61 ilustra a comparação entre os resultados numéricos e experimentais da temperatura na superfície adimensional do tijolo na estufa, quando está sendo seco a 80°C em função do tempo, considerando as direções do fluxo de ar em x e y.

Figura 4.61 Comparação entre o resultado numérico e experimental da temperatura adimensional em função do tempo de secagem para as diferentes direções do fluxo de ar.



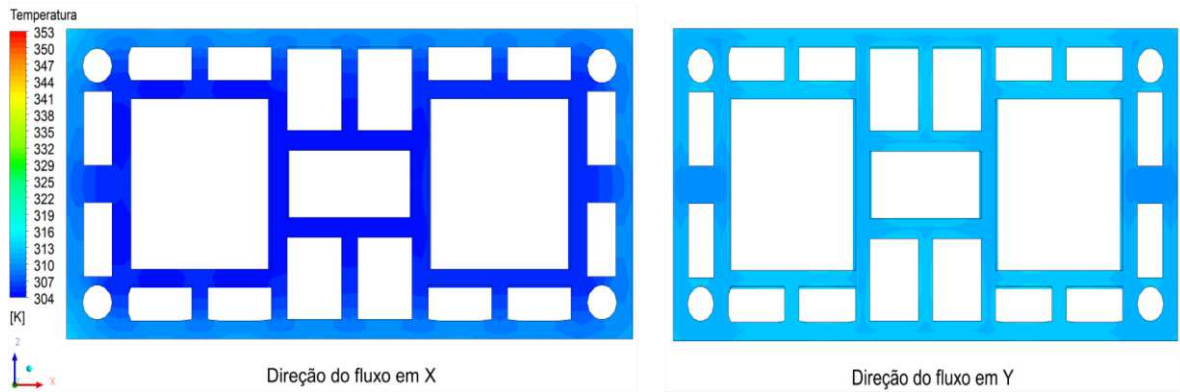
Na Figura 4.61 é apresentada um estudo comparativo entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do tijolo cerâmico estrutural, durante o processo de secagem para as diferentes direções adotadas para o fluxo de ar foi observado uma diferença nas duas situações adotadas, o que pode ser explicada pelo valor da velocidade do ar de secagem, o que aumenta consideravelmente o coeficiente de transferência de calor. Além disso, pode ser atribuído também aos procedimentos usados na realização dos experimentos, tais como posição do tijolo na estufa. Percebe-se ainda que, no intervalo de 50 a 450 minutos o produto que é posto sobre o fluxo de ar na direção y, tem-se um aquecimento maior em relação a direção x, isso pode ser justificado devido a área frontal principal de contato com o ar de secagem ser vazada. Este fenômeno pode ser observado melhor na Figura 4.62 sobre o plano em alguns instantes de tempo.

As Figuras 4.62 e 4.63 apresentam os campos de temperatura e teor de umidade médio sobre o plano XZ ($Y = 0,1 \text{ m}$) nos instantes 10, 30, 60 minutos e 15,5 horas sobre o tijolo na estufa para as diferentes direções de fluxo do ar de secagem.

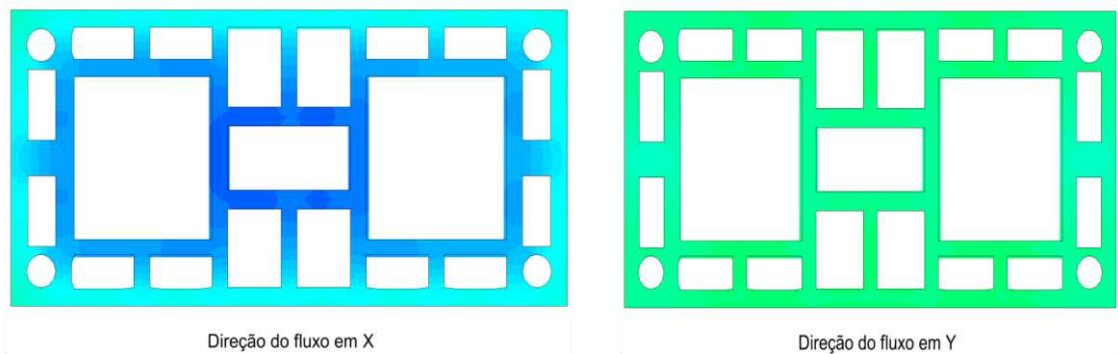
A Figura 4.62 ilustra a distribuição de temperatura na superfície do tijolo, notou-se que nas suas situações o aquecimento é mais acentuado nos vértices, podendo estas regiões ser mais propensas ao aparecimento de trincas, percebe-se que na primeira situação o centro demora mais para aquecer em relação ao segunda, fazendo com que necessite de um pouco mais de tempo nos instantes iniciais para a peça secar, pode-se ainda observar que o aquecimento da peça em que o fluxo de ar é considerado na direção y é maior em todos os instantes de tempo considerado e a distribuição do calor é mais uniforme.

Analisando as Figuras 4.62 e 4.63, numa visão geral verificou-se a existência de uma diferença do teor de umidade adimensional e da temperatura entre as regiões centrais e o vértice do tijolo. Observou-se ainda que os maiores gradientes de umidade e de temperatura estão localizados nas regiões próximas aos vértices do tijolo, uma vez que estas regiões estão em contato mais intenso com o ar de secagem, com isso as mesmas são mais susceptíveis ao aparecimento de trincas e deformações. Fisicamente, isto é esperado, pois, estando o sólido mais exposto a uma atmosfera envolvente, tende a variar mais rapidamente o valor de M^* e T nessas regiões no plano e em qualquer tempo. O teor de umidade adimensional e a temperatura apresentam os maiores resultados nas regiões centrais do material em qualquer tempo.

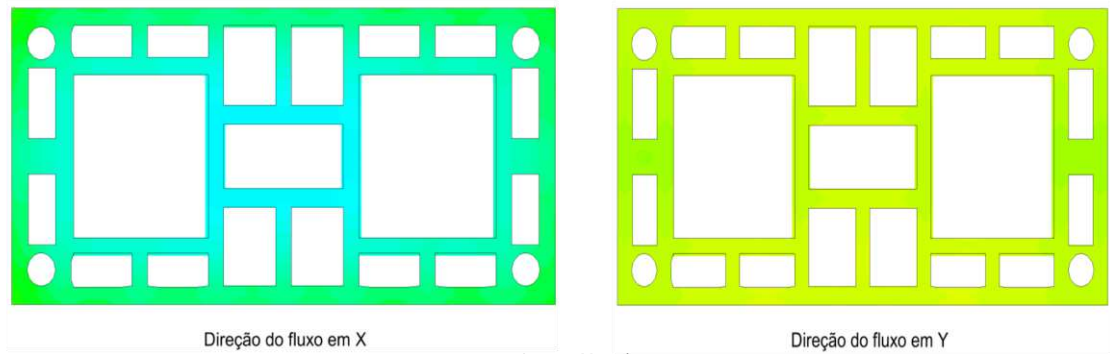
Figura 4.62 Influência da direção de fluxo na distribuição de temperatura, no plano XZ ($Y = 0,1 \text{ m}$), sobre tijolo na estufa, em diferentes tempos do processo ($T = 80^\circ\text{C}$, $UR = 5\%$).



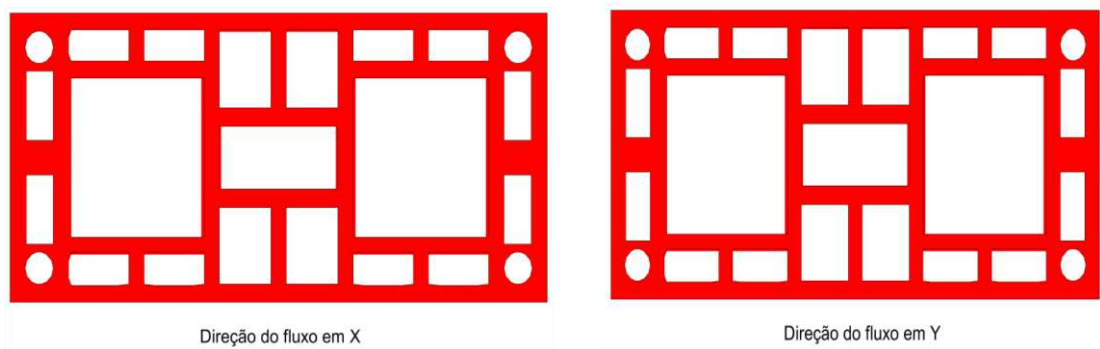
a) $t = 10$ minutos



b) $t = 30$ minutos

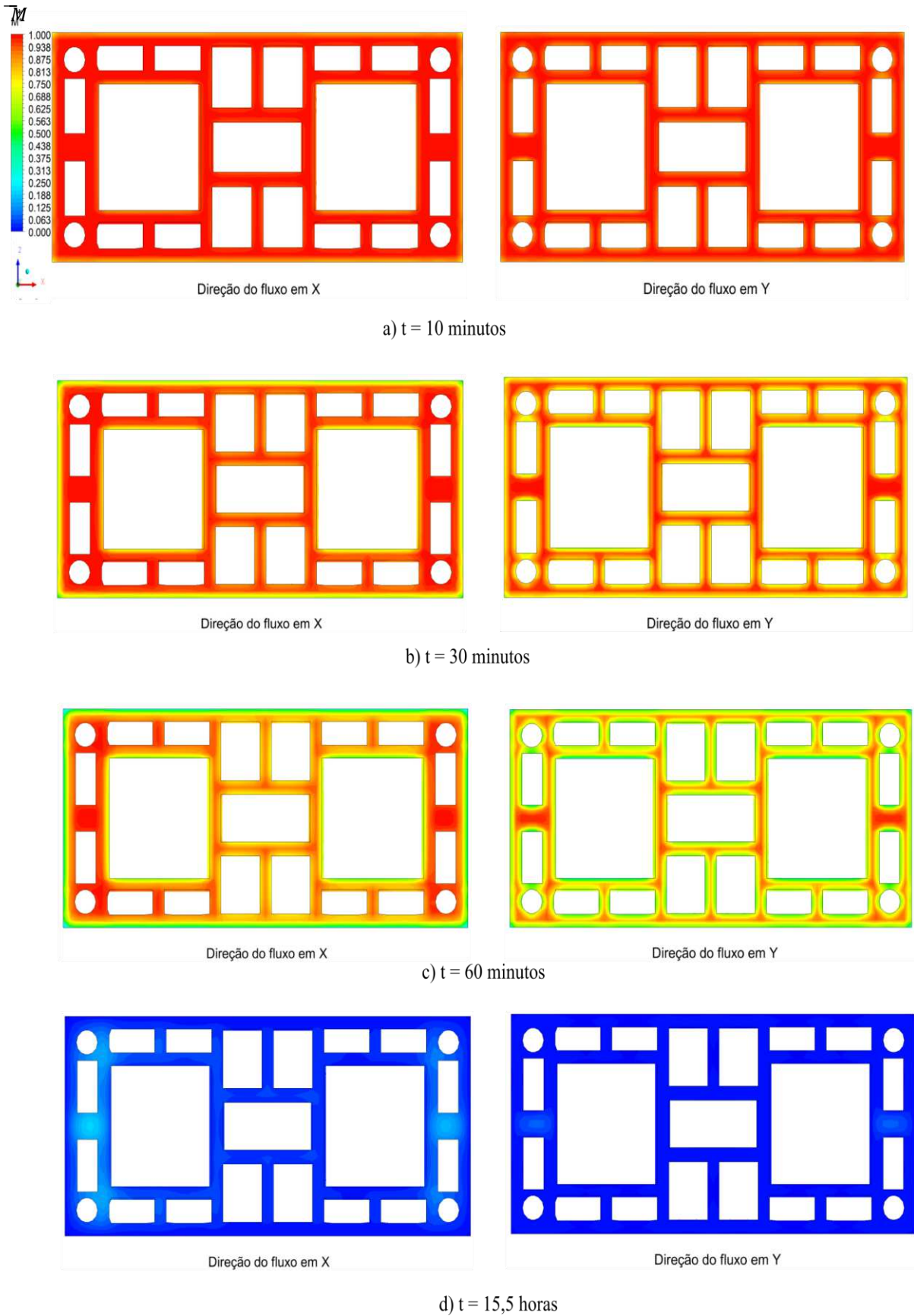


c) $t = 60$ minutos



d) $t = 15,5$ horas

Figura 4.63 Influência da direção de fluxo na distribuição do teor de umidade, no plano XZ ($Y = 0,1 \text{ m}$), sobre tijolo na estufa, em diferentes tempos do processo ($T = 80^\circ\text{C}$, $UR = 5\%$).



4.2.5 Estimativa dos coeficientes de transporte (D , h_m e h_c)

Os coeficientes de transportes de massa foram estimados a partir da minimização da soma dos quadrados dos resíduos, enquanto que o coeficiente de transferência de calor foi estimado por correlações como já mencionado no Capítulo 3. Os valores para estes parâmetros são apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9, bem como o erro relativo médio quadrático e variância para cada temperatura em estudo. Os valores baixos do erro médio quadrático indicam que os modelos se ajustam muito bem aos dados experimentais.

Como era esperado, todos os coeficientes de transporte de massa tendem a aumentar com o aumento da temperatura, e variam também com o decréscimo do teor de umidade do material como constatado por Hasatani e Itaya (1992).

Tabela 4.8 Coeficientes de transportes estimados para caso secagem de tijolo isoladamente.

T [°C]	$D \times 10^{+10}$ (m ² /s)	h_m (m/s)	h_c (W/m ² .K)	ERMQ _M (kg/kg) ²	\bar{S}_M^2 (kg/kg) ²	ERMQ _T [°C] ²	\bar{S}_T^2 [°C] ²
50	6	Infinito	1	0,001424	0,000043	273,79	8,3
60	7	Infinito	1	0,002431	0,000078	377,92	12,19
70	8	Infinito	1	0,002742	0,000091	1354,59	45,15
80	9	Infinito	1	0,003255	0,000112	353,59	12,19
90	10	Infinito	1	0,004452	0,000154	511,38	17,63
100	12	Infinito	1	0,004404	0,000169	591,95	26,61

Tomando o caso cuja temperatura é 80°C, percebe-se que os valores dos coeficientes de difusão para o caso considerando o domínio do ar na estufa é igual a $D = 32 \times 10^{-10}$ m²/s, enquanto que para o caso sem considerar o meio da estufa este valor é menor igual a $D = 9 \times 10^{-10}$ m²/s. Este fato pode ser justificado pela hipótese de usar a condição prescrita ou de primeira espécie para o caso do tijolo isoladamente e de terceira espécie (ou seja, condução-convecção) para o caso de tijolo em estufa.

Tabela 4.9 Coeficientes de transportes estimados para caso secagem de tijolo em estufa.

T [°C]	Dx10 ⁺¹⁰ (m ² /s)	h _m × 10 ⁺⁶ (m/s)	h _c (W/m ² .K)	ERMQ _M (kg/kg) ²	\bar{S}_M^2 (kg/kg) ²	ERMQ _T [°C] ²	\bar{S}_T^2 [°C] ²
50	9	2,31826	4,91725	0,001006	0,000030	113,7	3,45
60	17	4,47099	5,25844	0,001464	0,000047	900,77	29,06
70	20	3,50491	4,72416	0,003347	0,000112	623,65	20,79
80	32	5,04386	5,04715	0,002203	0,000076	4892	168,69
90	46	4,09681	4,94921	0,004270	0,000147	7628,33	263,05
100	85	6,65174	4,85609	0,006069	0,000233	7830,63	301,18

Para finalizar este estudo, fez uma análise comparativa do teor de umidade adimensional em relação ao número de Fourier definida pela Equação 4.1, onde verificou alguns tipos de tijolos reportados na literatura de Silva (2018), Silva (2009) e Nascimento (2002):

$$F_{o,m} = \left(\frac{D \cdot t}{L^2} \right). \quad (4.1)$$

onde D é o coeficiente de difusão efetivo, t é o tempo e $L = \left(\frac{S}{V} \right)$, é o comprimento característico.

Na Figura 4.64 apresenta-se o teor de umidade médio para três tipos de tijolos em função do número de Fourier $F_{o,m}$. Uma vez obtido os resultados para o tijolo estrutural, pôde-se então, compará-lo ao tijolo cerâmico vazado de 8 furos e o tijolo maciço. Para este estudo, as dimensões dos tijolos são diferentes, porém foram submetidos às mesmas condições de secagem. Esta comparação é possível pelo fato de se estar utilizando resultados adimensionais, portanto independente dos teores de umidade, coeficiente de difusão, tempo de processo e dimensões e forma do corpo, a secagem de um tijolo estrutural necessita de um tempo adimensional maior para secar e apresenta uma relação área/volume menor. Já o tijolo maciço, seca mais rápido, sendo isto devido ao aumento da relação área/volume do sólido, conforme mostra a Tabela 4.10, e reportado por Nascimento (2002), Silva (2009) e Silva (2018).

Tabela 4.10 Dimensões da área, volume e relação área/volume.

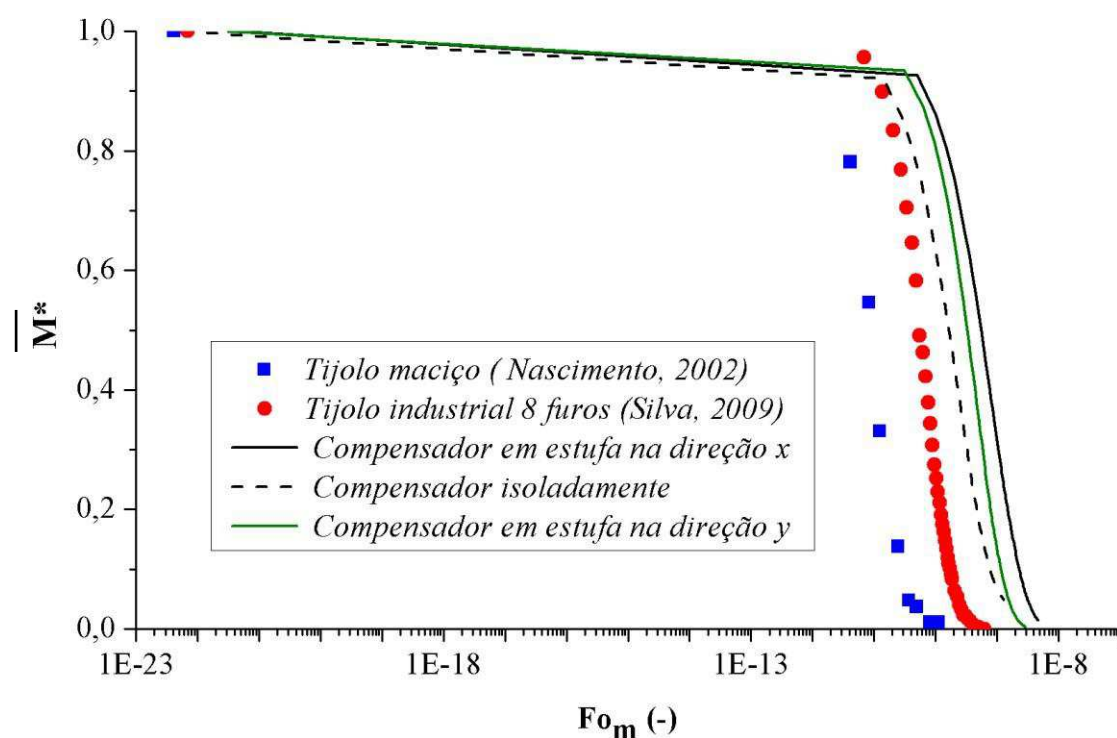
	S (m ²)	V (m ³)	S/V	Fonte
Tijolo Maçico (*)	0,000442	1,014x10 ⁻⁰⁶	435,9	Nascimento (2002)
Tijolo 8 Furos (**)	0,3711	0,00141	263,19	Silva (2009)
Tijolo Estrutural (***)	0,7498	0,00384	195,26	Silva (2018)

(*), (**) e (***) geometrias com suas respectivas dimensões ver em Apêndice C.

Assim, a mudança nas dimensões de uma peça, interfere fortemente na cinética de secagem do material. Neste caso, para todas as geometrias, e mesmo tipo de material, pode-se observar que a redução da espessura do sólido acelera o processo de transferência de calor e/ou massa, diminuindo, portanto o tempo total para que o processo de secagem se efetive.

Mediante o exposto nesta seção, observou-se que os resultados numéricos apresentam uma boa concordância com os dados experimentais outros dados reportados na literatura, indicando que a modelagem matemática baseada na teoria da difusão (Leis de Fick e Fourier) foi capaz de descrever bem o processo de secagem de tijolos estruturais (compensador 07).

Figura 4.64 Teor de umidade médio adimensional em função do número de Fourier para diferentes tipos de tijolos (T = 80°C).



CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 Conclusões

Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) Os resultados do estudo de convergência de malha mostram que para todas as variáveis o ICM apresenta diminuição com maior refinamento da malha. Além disso, os resultados mostram que a malha 1 e 2 apresentaram ICM dentro do limite aceitável para as variáveis temperatura e teor de umidade médio, com uma ressalta no estudo tijolo isolado, no instante de 10 minutos para variável teor de umidade o ICM não atingiu o intervalo assintótico, fato explicado devido aos maiores gradientes de temperatura ocorrer neste intervalo de tempo, para corrigir deveria realizar um novo refinamento da malha, mas devido ao custo computacional e como um bom acordo foi obtido com os dados experimentais não optou por realizar um novo refinamento, para o estudo escolheu-se a malha 2.
- b) O modelo adotado baseado na teoria da difusão e o solucionador mostram um comportamento aceitável para avaliar a transferência de calor e a massa no tijolo cerâmico, podendo ser utilizado em trabalhos futuros para a otimização e estudos de fenômenos na mesma linha de pesquisa;
- c) Constatam-se boa aproximação entre as curvas referentes aos dados experimentais e numéricos, do teor de umidade médio e temperatura superficial viabilizando a utilização do programa computacional aplicado;
- d) A modelagem matemática utilizada mostra-se adequada e generalizada, podendo ser utilizada para a obtenção de soluções em casos de secagem, resfriamento, aquecimento e umidificação;
- e) Os campos de umidade e temperatura permitem verificar as regiões de gradientes mais altos, as quais são as regiões onde há maior probabilidade de ocorrência de trincas e deformações, que podem reduzir a qualidade do produto após o processo de secagem;
- f) Sob o ponto de vista de transferência de calor e/ou massa, os gradientes de umidade e temperatura são maiores nos planos superficiais e nos vértices do sólido, que está em contato direto com o ar de secagem. Sendo assim, tais regiões são mais susceptíveis a ocorrência de choques térmicos, trincas e deformações, que comprometem a qualidade do produto obtido;

- g) A transferência de calor ocorre de maneira mais rápida em relação a transferência de massa, de tal forma que contribui para que o mesmo consiga atingir a temperatura de equilíbrio em um menor tempo, (rápido aquecimento do produto);
- h) O coeficiente de difusão de massa e o coeficiente de transferência de massa convectivo mostram-se dependente da temperatura do ar de secagem, tendendo a aumentar com o acréscimo desta;
- i) Com a análise estatística realizada, obteve-se o melhor coeficiente de difusão de massa em cada caso analisado, a escolha se deu através do menor erro obtido entre os dados experimentais e numéricos, o cálculo foi realizado a partir do método do erro mínimo quadrático.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como forma de enriquecer a discussão e aumentar a sua aplicabilidade prática, recomendam-se os seguintes tópicos a serem abordados em futuros trabalhos deste mesmo tema.

- a) Desenvolver modelo matemático que envolva a influência da posição do tijolo dentro da estufa nos fenômenos de transferência de calor e de massa durante a secagem;
- b) Desenvolver um modelo com malha móvel para levar em conta o efeito de encolhimento do meio poroso;
- c) Avaliar a qualidade da peça antes e após o processo da queima para os diferentes estudos de caso aqui propostos;
- d) Avaliar o efeito de parâmetros operacionais nas cinéticas de secagem e aquecimento do tijolo;
- e) Aplicar a metodologia de análise de dependência de malha em outras geometrias.

REFERÊNCIAS

ABCERAM (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA). Disponível em: <http://www.abceram.org.br> Acesso realizado em 27/07/2015.

ANFACER, (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, louças sanitárias e congêneres) – 2018. Disponível no site: <https://www.anfacer.org.br/historia-ceramica/> Acesso realizado em 27/04/2018.

ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica). Dados Oficiais. Rio de Janeiro. 2014.

ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica). Manuais – Bloco. Rio de Janeiro, 2002.

ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica). Artigo “Segredos da Secagem e Queima”. Revista da ANICER, Ano 11, edição 53, agosto, 2008.

ALMEIDA, G. S.; TAVARES, F. V. S.; LIMA, W.M.P.B.; LIMA, A.G. B. **Energetic and exergetic analysis of the clay bricks drying in an industrial tunnel dryer**, Defect and Diffusion Forum, v. 369, p. 104-109, 2016.

ALMEIDA, G. S.; FERNANDES, M.A.F. B.; FERNANDES, J.N. F.; NEVES, G. A.; LIMA, W.M.P. B.; LIMA, A.G. B. **Drying of industrial ceramic bricks: An experimental investigation in oven**. Defect and Diffusion Forum, v. 353, p. 116-120, 2014.

ALMEIDA, G. S.; SILVA, J. B.; SILVA, C. J.; SWARNAKAR, R.; NEVES, G. A. N.; LIMA, A.G.B. **Heat and mass transport in an industrial tunnel dryer: Modeling and simulation applied to hollow bricks**. Applied Thermal Engineering, v.55, p. 78-86, 2013.

ALMEIDA, G. da S.; CAVALCANTE, F. J. N.; LIMA, A. G. B. de. **Transporte de calor e massa em sólidos heterogêneos: Um estudo teórico via análise concentrada**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.5, n.1, p.1-16, 2003.

ALMEIDA, G. S. **Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais**. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2009.

AMBROZEWICZ, P.H.L. *Materiais de construção*. São Paulo: PINI, 2012.

ANTONIETTI, M.; HU, B.; WANG, K.; WU, L.; YU, S.; TITIRICI, M. *Engineering carbon materials from the hydrothermal carbonization process of biomass*, 2010.

ARAÚJO, M. V.; DELGADO, J.M.P.Q.; LIMA, A.G.B. **On the use of CFD in thermal analysis of industrial hollow ceramic brick**. *Diffusion Foundations*, v. 10, p. 70-82, 2017.

ARAÚJO, M. V.; SILVA, V. S.; LIMA, A. G. B.; MORAIS, K. F. **Análise térmica de tijolos cerâmico vazado via cfd**. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza – Ceará. P. 1 – 10, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7170**: tijolo maciço cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7171**: bloco cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: componentes cerâmicos parte 1: blocos cerâmicos para alvenaria de vedação: terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

AVELINO, D. O.; LIMA, A. G. B. de. **Simulação numérica do transporte de calor e massa durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados**. In: Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2006, Campina Grande.

BATISTA, V. R. **Secagem de materiais argilosos: modelagem, simulação e experimentação**. 2006. 80 p. Relatório Técnico-Científico PIBIC/UFCG-CCT.

BASTOS, F. A. **Avaliação do processo de fabricação de telhas e blocos cerâmicos visando a certificação do produto.** 2003, 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, PR, 2003.

BARBETTA, P.A.; REIS, M.M.; BORNIA, A.C. **Estatística para cursos de engenharia e informática.** 2.ed. São Paulo: Atlas, 2004. 410p.

BERN, M.; PLASSMANN, P. Chapter 6 - Mesh Generation A2 - Sack, J.-R. In: URRUTIA, J. (Ed.). **Handbook of computational geometry.** Amsterdam: North-Holland, 2000. p.291-332.

BILDHAUER, D., C.; BRUXEL, F., R.; SANTANA, E., R., R.; OLIVEIRA, E., C. Tijolos maciços com características refratárias a partir da incorporação de resíduo de mármore e granito. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n. 25, p. 01-100, 2015.

BRITO, M. K. T.; ALMEIDA, D. B. T.; LIMA, A. B. L. **Transferência de calor e massa durante a secagem de tijolos cerâmicos argilosos: um estudo analítico.** In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, IX, Fortaleza – Ceará. P. 1 – 9, 2016.

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

BUNCHAFT, G.; KELLNER, S.R. de O. **Estatística sem mistérios.** 4.ed. Petrópolis: Vozes, 2002. v.2, 303p.

BURITI, DE O., CIDRONIA J.; SARMENTO, L. R. B.; MOREIRA, G.; DE FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. DE. **Thermofluidodynamic Evaluation of Oil-Water Flow in the Presence of a Leak in Curved Connection: Modeling and Simulation.** Defect and Diffusion Forum, v. 366, p. 126-134, 2016.

BUSSAB, W. **Estatística básica.** Saraiva. 5a edição 2006. 540p.

CADÉ, M. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Secagem de tijolos cerâmicos vazados: uma aproximação por volumes finitos. **Revista Matéria**, v. 10, n. 3, p. 443-453, 2005.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de matérias: uma introdução**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMBUI, J. P. ; HOLANDA, P. R. H.; LIMA, A. G. B. . **Simulação numérica da secagem de casulos do bicho-da-seda em secador multi-zona via técnica dos volumes finitos**. In: 13^a. Jornada nacional de Iniciação Científica/58a Reunião anual da SBPC, 2006, Florianópolis_SC. Anais da 13a. Jornada nacional de Iniciação Científica/58a Reunião anual da SBPC, 2006. v. 1. p. 1-1.

CAVALCANTI, R. S.; FARIAS NETO, S. R.; VILAR, E. O. A computational fluid dynamics study of hydrogen bubbles in an electrochemical reactor. **Braz. arch. biol. technol.**, v. 48, 2005.

CELIK, I. B. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 078001-078001-4, 2008.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, J. J. **Transferência de calor e massa**. Uma abordagem prática. 4^a edição – Porto Alegre. AMGH Editora Ltda. 2012.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos**. Fundamentos e aplicações. 1^a edição – São Paulo: McGraw-Hill, 2007.

CERÂMICA ORLANDIM – (2018). Disponível em: <http://www.ceramicaorlandin.com.br/2014/produtos/tijolos-ceramicos>. Acesso realizado em: 08/10/2018.

CERÂMICA MIFALE – (2018). Disponível em: <http://www.ceramicamifale.com.br/estrutural-slider-png/>. Acesso realizado em: 08/10/2018.

CERRA, E., L.; IRURETA, O., O., A.; GÓES, P., R., N. **Materiais cerâmicos**. Curso de Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Acre. 2011.

CERÂMICA e OLARIA ABCD - (2018). Disponível no site: <http://www.blococeramico.com.br/tijolo-ceramico-estrutural>. Acesso realizado em: 14/08/2018.

CNI (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIAS) -SENAI. **Manual técnico para diagnóstico energético em indústrias de cerâmica vermelha**. Florianópolis, FIESC, 2008.

COSTA, T., LANÇA R. – Escoamento em Meios Porosos. Escola Superior de Tecnologia: Universidade do Algarve, 2001. 37 p.

CUNHA, A. DE L.; SOUZA, J. S. ; FARIAS NETO, S. R. ; LIMA, A. G. B.; BARBOSA, E. S. **Separation Process by Porous Membranes: A Numerical Investigation**. Advances in Mechanical Engineering (New York), v. 2014, p. 1-9, 2014.

ELIAS, X. **A fabricação de materiais cerâmicos**. Barcelona-Espanha, 1995, 205p.

FERREIRA, D.F. **Estatística básica**. 2.ed. Lavras: UFLA, 2009. 664p.

FERZIGER J, PERIC M. Computational methods for fluid dynamics. Springer, New York. 2002.

FIELD, ANDY (2013). Discovering statistics using SPSS. Londres: SAGE.

FIGLIOLA, R., S.; BEASLEY, D., E. **Theory and design for mechanical measurements**. 5ª Edição. 1995.

FLETCHER, B.; SAUNDERS, C. J. Exhaust ventilation of a surface treatment tank. **Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft**.v. 57, n.10, p. 423-428, 1997.

FORTES, M.; OKOS, M. R.; **Advances in drying**. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, U.S.A. v.1, p.119-154, 1980.

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C. B.; GONÇALVES, A. A. Mathematical modeling and effective diffusion of Schinus terebinthifolius leaves during drying, **Pesq. Agropec. Trop.**, v.44, p. 56-64, 2014.

GOOGLE. Disponível em:
<<https://www.google.com/search?q=imagem+de+um+forno+intermitente&client=firefox-b-ab&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=2ahUKEwiDsKP2w4LgAhW1GLkGHZItB-AgQsAR6BAgEEAE&biw=1354&bih=647#imgrc=w-UtE91iKrQYIM>>. Acesso em 10/04/2016.

GUIDUGLI – **Construção e acabamento.** Disponível em:
<<https://www.guidugli.com.br/tijolo-a-vista-vermelho>>. Acesso em: 08/10/2018.

HASATANI, N.; ITAYA, Y. Deformation characteristic of ceramics during drying, In: 8 th International Drying Symposium (IDS, 92), 1992, Montreal, **Proceedings...** Montreal, 1992, p. 190-199, Parte A.

ISERHARD, J. L. R. F. **Estimativa do tempo de secagem de meios porosos inertes à base de argila em um modelo experimental.** 2009. 171f. Tese (Doutorado em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JUNIOR, M. O.; TORQUETTI, Z. S. C. Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha. 2013. Federação das indústrias do estado de Minas Gerais – FIEMG. Belo horizonte-MG.

KARATEKIN, I. C. O. Numerical experiments on application of richarson extrapolation with nonuniform grids. **ASME Journal of Fluid Engineering**, v. 119, p. 584-590, 1997.

KAZMIER, L.J. **Estatística aplicada à administração e economia.** 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2007. 392p.

KELL, R. B. 1992, "Drying of loose and particulate materials", New York: Hemisphere Publishing Corporation, 502 p.

KENDALL, M. G.; STUART, D. G. (1973). *The Advanced Theory of Statistics – Vol 2: Inference and Relationship*. Londres: Griffin. pp. seção 20.4.

KHAN, F. A.; STRAATMAN, A. G. A conjugate fluid-porous approach to convective heat and mass transfer with application to produce drying, **Journal of Food Engineering**, v. 179, p. 55-67, 2016.

LEGGERINI, M., R., C. **Materiais cerâmicos na construção civil – Blocos cerâmicos -**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Faculdade de Engenharia – FENG. 2010.

LEHMKUHL, W. A. **Análise numérica e experimental de um secador contínuo utilizado na indústria de cerâmica vermelha**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

LONGEST, P. W.; VINCHURKAR, S. Effects of mesh style and grid convergence on particle deposition in bifurcating airway models with comparisons to experimental data. **Medical Engineering & Physics**, v. 29, n. 3, p. 350-366, 4// 2007.

LOPEZ, E. M.; CORTES, L. L. Moisture transfer analysis during drying of brick by temperature and relative humidity profiles. **European Scientific Journal**. v. 9, n 33, p 1857-7881 e p 1857-7431. 2013.

LUCENA, C, G. **Transporte de massa durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados via volumes finitos**. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica, 2005. Trabalho de Conclusão de Curso.

LUIKOV, A. V. Heat and mass transfer in capillary porous bodies. New York: Pergamon Press, 1966, 523p.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. Noções de Probabilidade e Estatística, 3 edições, Editora USP. 2001

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2004.

MANUAL ANSYS CFX 15.1, 2015.

MARTINS, I. O.; QUADRI, M. B.; NICOLAU, V. de P.; MIOTTO, F. **Simulação da secagem convectiva de um tijolo de argila vermelha vazado**. COBEQ - XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Fortaleza/CE. 8f. (2016).

MARINHO, J. L. G.; LUIS, G. M. J. **Unsteady fluidynamic behavior of gas bubbles flowing in curved pipes: A numerical study**. Advances in Chemical Engineering and Science, v. 02, p. 283-291, 2012.

MEDEIROS, M.H.F.; SOUZA, D.J.; FILHO, J.H.; ADORNO, C.S.; QUARCIONI, V.A.; PEREIRA, E. Resíduo de cerâmica vermelha e fíler calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-sílica. **Revista Matéria**, v. 21, n. 2, p. 282 – 300, 2016.

MILMAN, M.J. **Equipamento para pré-processamento de grãos**. Editora e Gráfica Universitária da Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, 2002.

MINEROPAR. A preparação de argilas para a produção de telhas e blocos cerâmicos. Curitiba, 2007. p.36.

MUJUNDAR, A.S. Handbook of Industrial Drying. Taylor & Francis, New York, 2007.

NASCIMENTO, J.J.S.; BELO, F. A.; LIMA, A. G. B., **Experimental drying of ceramics bricks including shrinkage**, Defect and Diffusion Forum, v. 365, p. 106-111, 2015.

NASCIMENTO, J. J. S.; BATISTA, V. R.; LIMA, A. G. B. Secagem e queima de tijolos cerâmicos maciços e vazados incluindo variações dimensionais e danos estruturais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 3, p. 46-61, 2008.

NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B.; NEVES, G. A.; BATISTA, V. R.; SANTANA, E. W. F.; BELO, F. A.; SANTANA, L. N. **Experimental drying of ceramic bricks including shrinkage**. Proceedings of the 18 th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto-MG. v. 1. p. 1-7, 2005.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de Caso: Secagem de materiais cerâmicos**, 2002. 207f. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. DTM/CT/UFPB.

NETO, D. Blocos cerâmicos deixam de ser opção apenas para vedação e ganham espaço na alvenaria estrutural. **Revista téchne**. 2017. Disponível em: <https://techne.pini.com.br/2017/02/blocos-ceramicos-deixam-de-ser-opcao-apenas-para-vedacao-e-ganham-espaco-na-alvenaria-estrutural/>.

NETCERAMICS, Portal. **Informações Técnicas - Processo de Fabricação**. 2016(a). Disponível em <<http://www.netceramics.com/InformacoesTecnicas/ProcessodeFabricacao/>>. Acesso em: 03/02/2016.

NETCERAMICS, Portal. **Tudo sobre o Programa Setorial de Qualidade (PSQ)**. 2016(b). Disponível em <http://www.netceramics.com/Home_PortalNetCeramics_Ceramicas_Ceramica/IndustriaCeramica/TudosobrePSQ/>. Acesso em: 03/02/2016.

NEYMAN, J. «Outline of a Theory of Statistical Estimation Based on the Classical Theory of Probability». *Philosophical Transactions of the Royal Society*.v. 236, p. 333 – 380, 1937.

OLIVEIRA, B.F; SILVA.M. A; FREITAS, M.S. **Secagem de materiais Cerâmicos. Trabalho da Disciplina de Materiais Cerâmicos**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ, 2010.

OLIVEIRA, A. P. N.; MONTEDO, O. R. K.; PIZETE, J, CASAGRANDE, M. **Matérias primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influências sobre as propriedades do produto final**, 2005. Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica.

ORLANDIN – Telhas de concreto e tijolos cerâmicos. Disponível em:
<<http://www.ceramicaorlandin.com.br/2014/produtos/tijolos-ceramicos>>. Acesso em:
08/10/2018

PATINO, C., M.; FERREIRA, J., C. **Intervalos de confiança: uma ferramenta útil para estimar o tamanho do efeito no mundo real**. J Bras Pneumol. v. 41, n. 6, p.565-566, 2015.

PAUDEL, S.; SAENGER, N. Grid refinement study for three dimensional CFD model involving incompressible free surface flow and rotating object. **Computers & Fluids**, v. 143, p. 134-140, 2017.

PAULETTI, M. C. **Modelo para introdução de nova tecnologia em agupamentos de micro e pequenas empresas: estudo de caso da indústria de cerâmica vermelha no Vale do Rio Tijucas**. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, 2001.

PEREIRA FILHO, G. H. S. **Transporte não-isotérmico de óleos pesados em risers submersos**. Monografia (Especialização em Tecnologia de Petróleo e Gás PRH-25/ANP/UFCG) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

PRECERAM – Industrias de construção SA. Disponível em: < www.preceram.pt > Acesso: 15/04/2016.

RIBEIRO, Carmen Couto; PINTO, Joana Darc da Silva; STARLING, Tadeu. **Materiais de Construção Civil**. Belo Horizonte, 2002.

RICHARDSON, L. F.; GAUNT, J. A. The Deferred Approach to the Limit. Part I. Single Lattice. Part II. Interpenetrating Lattices. **Philosophical transactions of the royal society of**

London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, v. 226, n. 636-646, p. 299-361, 1927.

ROACHE, P. J. Perspective: A Method for uniform reporting of grid refinement studies. **Journal of Fluids Engineering**, v. 116, n. 3, p. 405-413, 1994.

ROCHA, F. N.; SUAREZ, P. A. Z.; GUIMARÃES, E. M. Guimarães. Argilas e suas aplicações em utensílios e materiais cerâmicos. **Revista Virtual de Química**. v. 6, n 4, p. 1105-1120, 2014.

SANCHEZ, E.; BARBA, A. **Defeitos em revestimentos cerâmicos: suas causas e soluções**. Laboratório de Revestimentos Cerâmicos – Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) – Universidade Federal de São Carlos (UFCar), 1998.

SANTOS JR, E. L.; LIED, E. B.; ACERGO, C. V.; FAQUIM, V.; FRARE, P. R.; MOREJON, C. F. M.; Avaliação de impacto ambiental da indústria cerâmica estrutural como ferramenta da produção mais limpa. **International Workshop Advances in cleaner Production**, São Paulo, 2017.

SANTOS, A.S.; SANTOS, E.S. **Correlação e Regressão estatística**. UFBA. Salvador, (2009).

SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha**. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina – SC.2001.

SARMENTO, L.R.B., **Escoamento multifásico em conexões curvadas acopladas a oleodutos com vazamentos: modelagem e simulação**. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande – PB. 2014.

SEBRAE/ESPM. **Cerâmica Vermelha**. Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM – Relatório Completo, Sebrae Nacional, São Paulo, 2008.

SILVA, J. B. **Secagem de blocos cerâmicos industriais: modelagem, simulação e experimentação.** 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2018.

SILVA, S. **Como fazer argila caseira.** 2017. Disponível em: <https://artes.umcomo.com.br/artigo/como-fazer-argila-caseira-11299.html>

SILVA, V. S.; SILVA, G. I.; JUNIOR, D. R. L.; MELO, G. A. G.; LIMA, A. G. B.; LIMA, W. M. P. B. **Análise termo – hídrica durante a secagem de um material cerâmico vazado usando o método de análise concentrada.** IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza – Ceará. P. 1 – 9, 2016.

SILVA, A. P. M.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; PASKOCIMAS, C. A. Estudo do perfil térmico de fornos do tipo "caipira" utilizados pelo setor de cerâmica vermelha em parselhas na região do seridó, RN. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 39, n.5, p. 963 - 972, 2015.

SILVA, J. B.; ALMEIDA, G. S.; NEVES, G de A.; LIMA, W. C. P. B.; NETO, S. R. de F.; LIMA, A. G. B. Heat and mass transfer and volume variations during drying of industrial ceramic bricks: An experimental investigation, **Defect and Diffusion Forum**, v. 326, p. 267-272, 2012.

SILVA, J. B.; ALMEIDA, G. S.; NEVES, G de A.; LIMA, W. C. P. B.; LIMA, A. G. B. Heat and mass diffusion including shrinkage and hygrothermal stress during drying of holed ceramics bricks, **Defect and Diffusion Forum**, v. 312-315, p. 971-976, 2011.

SILVA, J. B. **Simulação e Experimentação da Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados.** 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2009.

SING, R. P.; HELDMAN, D. R. Introduction to food engineering. 4th ed. London: Academic Press, 841p. (**Food Science and Technology, International Series**), 2009.

SCHULTZ, D. P.; SCHULTZ, S. E. **História da psicologia moderna**. 16. ed. São Paulo: Cultrix, 1992. 439 p.

STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. **Theoretical and practical aspects of rough rice tempering**. Transactions of the ASAE, v.23, n.3, p.775-782, 1980.

STEIL, O. S. **Energia do gás natural em fornos de cerâmica estrutural**. Florianópolis: SCGÁS, jul. 2000. (Projeto).

STEVENSON, W.J. **Estatística aplicada à administração**. São Paulo: Harbra, 2001. 495p.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, science and design**. Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA, 448p. 1986.

SULLIVAN, LISA. «Confidence Intervals». Boston University. Consultado em 21 de março de 2017.

TAPIA, R. E. C.; VILAR, S.C. **Manual para a indústria de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro, 2000. (Série Uso Eficiente de Energia).

TAVARES, F.V. de S.; NETO, S.R.F.; BARBOSA, E.S.; LIMA, A.G.B.; SILVA, C.J. **Drying of Ceramic Hollow Bricks in an Industrial Tunnel Dryer: A Finite Volume Analysis**, The International Journal of Multiphysics, v. 8, p. 297-312, 2014.

THOMAZ, E.; FILHO, C. V. M.; CLETO, R. F.; CARDOSO, F. F. **Alvenaria de vedação em blocos cerâmicos**. IPT – Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo. 2009.

THOMAZ, E. **Patologia**. In: TAUIL, C. A. **Manual técnico de alvenaria**. São Paulo, ABCI/PROJETO, 1990. p. 97-117.

THOMPSON C.P., WILKES N.S. AND JONES I.P. **Numerical studies of buoyancy-driven turbulent flows in a rectangular cavity**, Int. J. Num. Meth. Eng., v. 24, p. 89-99, 1987.

VERSTEEG, H.K., MALLASEKERA, W.,” **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**”. Longman Group Ltd, Malaysia, 1995.

VOLK, A.; GHIA, U.; STOLTZ, C. Effect of grid type and refinement method on CFD-DEM solution trend with grid size. **Powder Technology**, v. 311, p. 137-146, 2017.

WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H.; MYERS, S. L.; YE, K. **Probability & statistics for engineers & scientists**. 9th. Ed. ISBN 978-0-321-62911-1. *Boston-USA/2011*.

WARSI, Z.U.A. (1999) *Fluid Dynamics: Theoretical and Computational Approaches*. 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton.

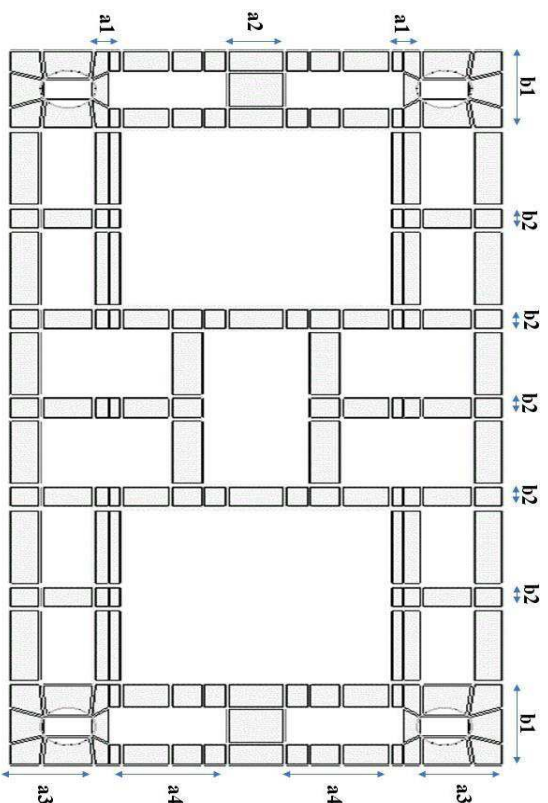
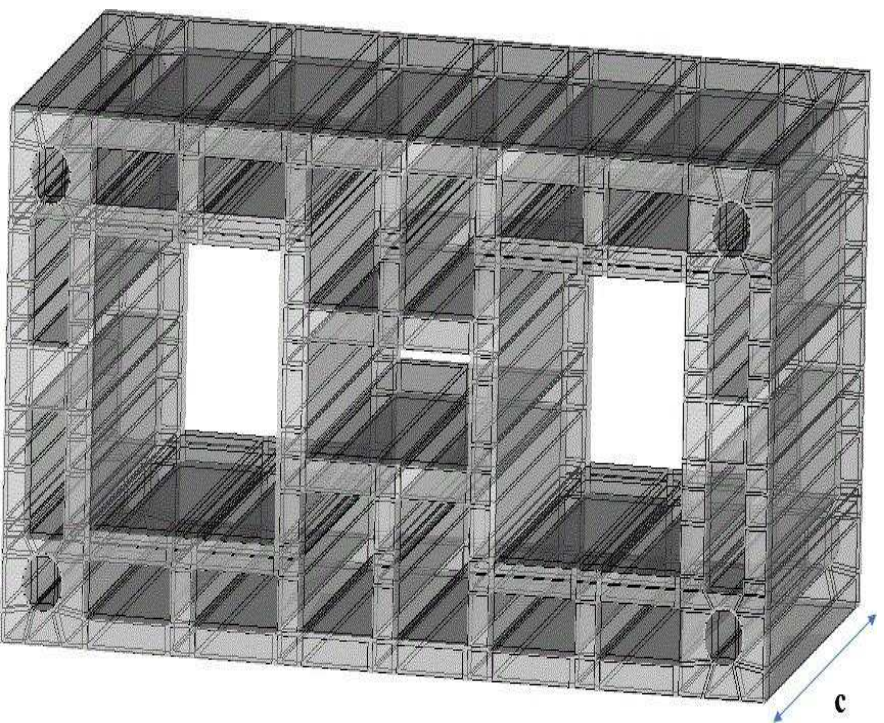
ZANDONADI, A. R.; JORDÃO, M. A. P., Informações técnicas sobre cerâmica, Anuário Brasileiro de Cerâmica, ABC, S. Paulo (2002).

ZAR, J. H. (1984). **Biostatistical Analysis**. New Jersey: Prentice Hall International. p. 43 – 45

ZHOU, M. «Formulas for Exam 2» . University of Kentucky. Consultado em 21 de março de 2017

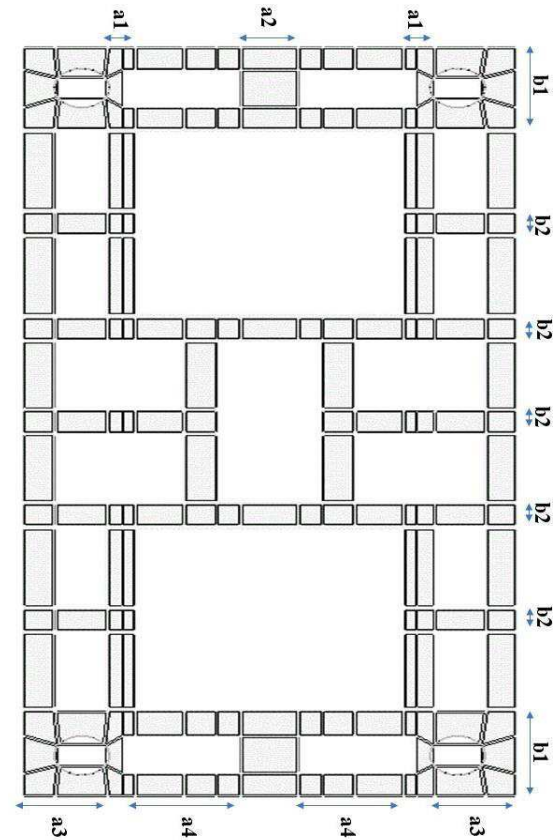
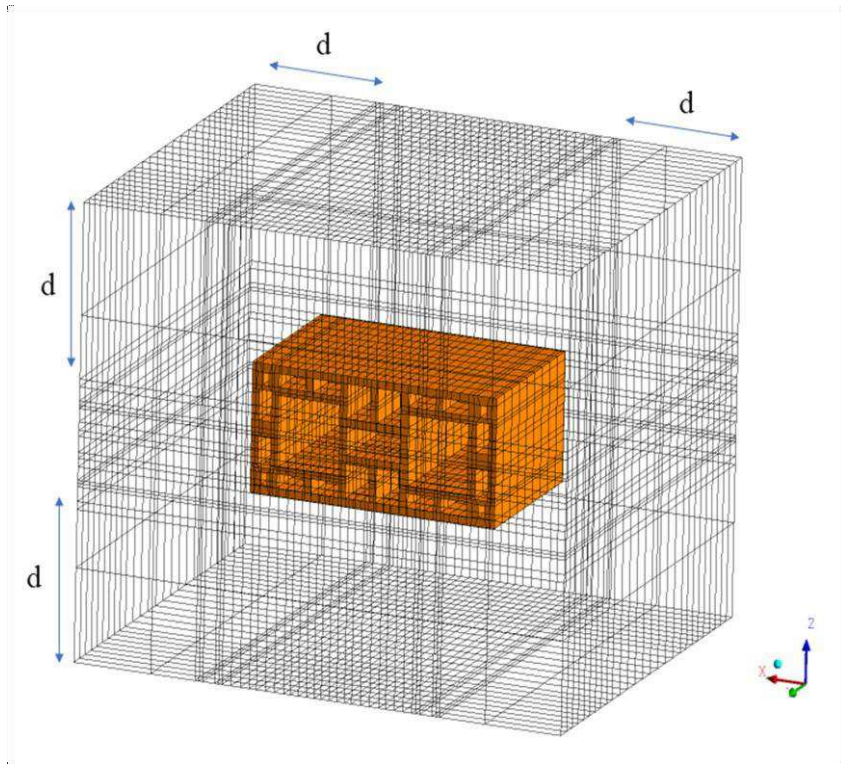
• Refinamento da malha tijolo compensador

	Número de nós									N° de elementos	Tempo de simulação			
	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	c	Total		dias	horas	minutos	segundos
<i>Malha 3</i>	4	4	8	16	16	4	8	20	41.496	52.640	0	3	51	50
<i>Malha 2</i>	5	5	10	20	20	5	10	25	52.640	169.940	0	11	58	9,13
<i>Malha 1</i>	6	6	12	24	24	6	12	30	472.960	419.328	1	6	5	30,959



• Refinamento da malha tijolo em estufa

	Número de nós									Nº de elementos	Tempo de simulação				
	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	c	d		Total	dias	horas	minutos	segundos
Malha 3	2	2	4	8	8	2	4	10	3	24.936	18.981	0	7	27	18,951
Malha 2	4	4	8	16	16	4	8	15	5	231.108	202.566	1	12	19	53,433
Malha 1	6	6	12	24	24	6	12	20	7	785.968	719.055	3	10	53	11,024



APÊNDICE B – Dados das simulações numéricas

Secagem do tijolo compensador isoladamente

Tabelas A1 – Temperatura de Secagem 50°C

Resíduo médio quadrático									
D = 6x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M (%)	Erro_T (%)
1	0	0,172319	0,172319	0,000000	31,5	31,5	0,0	0,0	0,0
2	5	0,169412	0,169412	0,000000	33,5	33,5	0,0	0,0	0,0
3	10	0,167636	0,163895	0,000014	33,6	32,4	1,5	2,2	3,7
4	15	0,165213	0,165213	0,000000	34,7	34,7	0,0	0,0	0,0
5	20	0,162952	0,156433	0,000042	34,2	33,1	1,3	4,0	3,3
6	25	0,160207	0,160207	0,000000	36,0	36,0	0,0	0,0	0,0
7	30	0,157784	0,149751	0,000065	35,7	33,7	3,9	5,1	5,5
8	40	0,153101	0,143702	0,000088	37,7	34,4	11,2	6,1	8,9
9	50	0,147933	0,138175	0,000095	38,4	34,9	12,0	6,6	9,0
10	60	0,142603	0,133084	0,000091	40,3	35,5	23,1	6,7	11,9
11	70	0,138081	0,128362	0,000094	38,8	36,0	7,7	7,0	7,1
12	80	0,133398	0,123959	0,000089	39,6	36,5	9,4	7,1	7,7
13	90	0,129845	0,119831	0,000100	40,3	37,0	10,7	7,7	8,1
14	120	0,117571	0,108808	0,000077	42,5	38,4	16,9	7,5	9,7
15	150	0,106751	0,099387	0,000054	44,3	39,6	22,1	6,9	10,6
16	180	0,096092	0,091197	0,000024	45,7	40,7	25,2	5,1	11,0
17	210	0,087048	0,083998	0,000009	46,5	41,6	23,6	3,5	10,4
18	240	0,078327	0,077623	0,000000	49,5	42,5	48,8	0,9	14,1
19	270	0,071867	0,071948	0,000000	48,2	43,3	24,1	0,1	10,2
20	330	0,058624	0,062337	0,000014	47,3	44,6	7,2	6,3	5,7
21	390	0,049257	0,054589	0,000028	48,3	45,7	6,8	10,8	5,4
22	450	0,041990	0,048302	0,000040	49,0	46,5	6,1	15,0	5,0
23	510	0,032623	0,043172	0,000111	49,2	47,2	3,9	32,3	4,0
24	570	0,031008	0,038968	0,000063	47,6	47,8	0,0	25,7	0,4
25	630	0,028424	0,035511	0,000050	49,3	48,2	1,2	24,9	2,2
26	690	0,025517	0,032656	0,000051	47,8	48,6	0,6	28,0	1,6
27	750	0,023902	0,030292	0,000041	49,5	48,9	0,4	26,7	1,3
28	810	0,021964	0,028328	0,000040	47,2	49,1	3,5	29,0	4,0
29	870	0,021156	0,026691	0,000031	49,0	49,3	0,1	26,2	0,5
30	930	0,020349	0,025323	0,000025	49,0	49,4	0,2	24,4	0,8
31	990	0,019380	0,024177	0,000023	49,3	49,5	0,1	24,8	0,5
32	1050	0,018249	0,023213	0,000025	48,8	49,6	0,7	27,2	1,7
33	1110	0,017926	0,022402	0,000020	48,4	49,7	1,7	25,0	2,7
34	1170	0,017442	0,021716	0,000018	49,6	49,8	0,0	24,5	0,3
Soma dos erros				0,001424			273,79	12,6	4,9
Variância				0,000043			8,30		
Desvio padrão				0,006570			2,88		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 6x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,17232	0,17232	0,02969	0,02969	0,02969	34	31,5	31,5	992,3	992,2	992,2	34
0,16941	0,16941	0,02870	0,02870	0,02870	∑(X.Y)	33,5	33,5	1122,3	1122,3	1122,3	∑(X.Y)
0,16764	0,16389	0,02810	0,02686	0,02747	0,367	33,6	32,4	1129,0	1047,3	1087,4	53278,3
0,16521	0,16521	0,02730	0,02730	0,02730	∑(X)	34,7	34,7	1204,1	1204,1	1204,1	∑(X)
0,16295	0,15643	0,02655	0,02447	0,02549	2,986	34,2	33,1	1169,6	1093,9	1131,2	1284,2
0,16021	0,16021	0,02567	0,02567	0,02567	∑X ²	36,0	36,0	1296,0	1296,0	1296,0	∑X ²
0,15778	0,14975	0,02490	0,02243	0,02363	0,378	35,7	33,7	1274,5	1137,9	1204,3	56051,3
0,15310	0,14370	0,02344	0,02065	0,02200	(∑X) ²	37,7	34,4	1421,3	1180,1	1295,1	(∑X) ²
0,14793	0,13817	0,02188	0,01909	0,02044	8,916	38,4	34,9	1474,6	1220,7	1341,6	1649169,6
0,14260	0,13308	0,02034	0,01771	0,01898	∑(Y)	40,3	35,5	1624,1	1260,0	1430,5	∑(Y)
0,13808	0,12836	0,01907	0,01648	0,01772	2,975	38,8	36,0	1505,4	1298,1	1397,9	1220,6
0,13340	0,12396	0,01780	0,01537	0,01654	∑Y ²	39,6	36,5	1568,2	1335,1	1447,0	∑Y ²
0,12985	0,11983	0,01686	0,01436	0,01556	0,357	40,3	37,0	1624,1	1371,1	1492,3	50776,7
0,11757	0,10881	0,01382	0,01184	0,01279	(∑Y) ²	42,5	38,4	1806,3	1473,4	1631,4	(∑Y) ²
0,10675	0,09939	0,01140	0,00988	0,01061	8,851	44,3	39,6	1962,5	1567,8	1754,1	1489913,3
0,09609	0,09120	0,00923	0,00832	0,00876	n.∑(X.Y)	45,7	40,7	2088,5	1654,6	1858,9	n.∑(X.Y)
0,08705	0,08400	0,00758	0,00706	0,00731	12,473	46,5	41,6	2162,3	1734,4	1936,6	1811462,7
0,07833	0,07762	0,00614	0,00603	0,00608	n.∑X ² -(∑X) ²	49,5	42,5	2450,3	1807,6	2104,5	n.∑X ² -(∑X) ²
0,07187	0,07195	0,00516	0,00518	0,00517	3,935	48,2	43,3	2323,2	1874,4	2086,8	256573,9
0,05862	0,06234	0,00344	0,00389	0,00365	n.∑Y ² -(∑Y) ²	47,3	44,6	2237,3	1990,9	2110,5	n.∑Y ² -(∑Y) ²
0,04926	0,05459	0,00243	0,00298	0,00269	3,292	48,3	45,7	2332,9	2087,1	2206,6	236494,6
0,04199	0,04830	0,00176	0,00233	0,00203	r	49,0	46,5	2401,0	2165,9	2280,4	r
0,03262	0,04317	0,00106	0,00186	0,00141	0,997	49,2	47,2	2420,6	2230,3	2323,5	0,990
0,03101	0,03897	0,00096	0,00152	0,00121		47,6	47,8	2265,8	2282,6	2274,1	
0,02842	0,03551	0,00081	0,00126	0,00101		49,3	48,2	2430,5	2325,0	2377,1	
0,02552	0,03266	0,00065	0,00107	0,00083		47,8	48,6	2284,8	2359,2	2321,7	
0,02390	0,03029	0,00057	0,00092	0,00072		49,5	48,9	2450,3	2386,9	2418,4	
0,02196	0,02833	0,00048	0,00080	0,00062		47,2	49,1	2227,8	2409,2	2316,7	
0,02116	0,02669	0,00045	0,00071	0,00056		49,0	49,3	2401,0	2427,1	2414,0	
0,02035	0,02532	0,00041	0,00064	0,00052		49,0	49,4	2401,0	2441,5	2421,2	
0,01938	0,02418	0,00038	0,00058	0,00047		49,3	49,5	2430,5	2453,1	2441,8	
0,01825	0,02321	0,00033	0,00054	0,00042		48,8	49,6	2381,4	2462,4	2421,6	
0,01793	0,02240	0,00032	0,00050	0,00040		48,4	49,7	2342,6	2469,8	2405,4	
0,01744	0,02172	0,00030	0,00047	0,00038		49,6	49,8	2460,2	2475,8	2468,0	

Distribuição T - Student													
D = 6x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp)	M _(Num)	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp)	T _(Num)	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
[kg/kg,b.s]	[kg/kg,b.s]			Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}	[°C]	[°C]			Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}
0,172319	0,172319	0,000000	34	0,172319	0,159327	0,185311	31,5	31,5	0,0	34	31,5	25,6	37,4
0,169412	0,169412	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,169412	0,156420	0,182404	33,5	33,5	0,0	$\sum(X-Y)^2$	33,5	27,6	39,4
0,167636	0,163895	0,000014	0,001	0,163895	0,154644	0,180628	33,6	32,4	1,5	271,4	33,6	27,7	39,5
0,165213	0,165213	0,000000	GL	0,165213	0,152221	0,178205	34,7	34,7	0,0	GL	34,7	28,8	40,6
0,162952	0,156433	0,000042	33	0,156433	0,149960	0,175944	34,2	33,1	1,3	33	34,2	28,3	40,1
0,160207	0,160207	0,000000	σ^2	0,160207	0,147215	0,173199	36,0	36,0	0,0	σ^2	36,0	30,1	41,9
0,157784	0,149751	0,000065	4,056E-05	0,149751	0,144792	0,170776	35,7	33,7	3,9	8,2	35,7	29,8	41,6
0,153101	0,143702	0,000088	σ	0,143702	0,140109	0,166093	37,7	34,4	11,2	σ	37,7	31,8	43,6
0,147933	0,138175	0,000095	0,01	0,138175	0,134941	0,160925	38,4	34,9	12,0	2,9	38,4	32,5	44,3
0,142603	0,133084	0,000091	Área	0,133084	0,129611	0,155595	40,3	35,5	23,1	Área	40,3	34,4	46,2
0,138081	0,128362	0,000094	0,03	0,128362	0,125089	0,151073	38,8	36,0	7,7	0,03	38,8	32,9	44,7
0,133398	0,123959	0,000089	t($\alpha/2$)	0,123959	0,120406	0,146390	39,6	36,5	9,4	t($\alpha/2$)	39,6	33,7	45,5
0,129845	0,119831	0,000100	2,04	0,119831	0,116853	0,142837	40,3	37,0	10,7	2,04	40,3	34,4	46,2
0,117571	0,108808	0,000077		0,108808	0,104579	0,130563	42,5	38,4	16,9		42,5	36,6	48,4
0,106751	0,099387	0,000054		0,099387	0,093759	0,119743	44,3	39,6	22,1		44,3	38,4	50,2
0,096092	0,091197	0,000024		0,091197	0,083100	0,109084	45,7	40,7	25,2		45,7	39,8	51,6
0,087048	0,083998	0,000009		0,083998	0,074056	0,100040	46,5	41,6	23,6		46,5	40,6	52,4
0,078327	0,077623	0,000000		0,077623	0,065335	0,091319	49,5	42,5	48,8		49,5	43,6	55,4
0,071867	0,071948	0,000000		0,071948	0,058875	0,084859	48,2	43,3	24,1		48,2	42,3	54,1
0,058624	0,062337	0,000014		0,062337	0,045632	0,071616	47,3	44,6	7,2		47,3	41,4	53,2
0,049257	0,054589	0,000028		0,054589	0,036265	0,062249	48,3	45,7	6,8		48,3	42,4	54,2
0,041990	0,048302	0,000040		0,048302	0,028998	0,054982	49,0	46,5	6,1		49,0	43,1	54,9
0,032623	0,043172	0,000111		0,043172	0,019631	0,045615	49,2	47,2	3,9		49,2	43,3	55,1
0,031008	0,038968	0,000063		0,038968	0,018016	0,044000	47,6	47,8	0,0		47,6	41,7	53,5
0,028424	0,035511	0,000050		0,035511	0,015432	0,041416	49,3	48,2	1,2		49,3	43,4	55,2
0,025517	0,032656	0,000051		0,032656	0,012525	0,038509	47,8	48,6	0,6		47,8	41,9	53,7
0,023902	0,030292	0,000041		0,030292	0,010910	0,036894	49,5	48,9	0,4		49,5	43,6	55,4
0,021964	0,028328	0,000040		0,028328	0,008972	0,034956	47,2	49,1	3,5		47,2	41,3	53,1
0,021156	0,026691	0,000031		0,026691	0,008164	0,034148	49,0	49,3	0,1		49,0	43,1	54,9
0,020349	0,025323	0,000025		0,025323	0,007357	0,033341	49,0	49,4	0,2		49,0	43,1	54,9
0,019380	0,024177	0,000023		0,024177	0,006388	0,032372	49,3	49,5	0,1		49,3	43,4	55,2
0,018249	0,023213	0,000025		0,023213	0,005257	0,031241	48,8	49,6	0,7		48,8	42,9	54,7
0,017926	0,022402	0,000020		0,022402	0,004934	0,030918	48,4	49,7	1,7		48,4	42,5	54,3
0,017442	0,021716	0,000018		0,021716	0,004450	0,030434	49,6	49,8	0,0		49,6	43,7	55,5

Tabelas A2 – Temperatura de Secagem 60°C

Resíduo médio quadrático									
D = 7x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M (%)	Erro_T (%)
1	0	0,173163	0,173163	0,000000	32,0	32,0	0,0	0,0	0,0
2	5	0,170288	0,170288	0,000000	34,8	34,8	0,0	0,0	0,0
3	10	0,167572	0,163088	0,000020	33,6	33,3	0,1	2,7	0,9
4	15	0,165335	0,165335	0,000000	33,8	33,8	0,0	0,0	0,0
5	20	0,163419	0,154324	0,000083	35,1	34,4	0,5	5,6	2,0
6	25	0,161022	0,161022	0,000000	35,6	35,6	0,0	0,0	0,0
7	30	0,158786	0,146586	0,000149	36,0	35,4	0,4	7,7	1,7
8	40	0,153035	0,139658	0,000179	38,8	36,3	6,2	8,7	6,4
9	50	0,147444	0,133383	0,000198	39,2	37,2	4,0	9,5	5,1
10	60	0,142013	0,127644	0,000206	42,0	38,0	15,6	10,1	9,4
11	70	0,137220	0,122352	0,000221	42,0	38,9	9,9	10,8	7,5
12	80	0,132109	0,117442	0,000215	42,8	39,6	10,1	11,1	7,4
13	90	0,126198	0,112862	0,000178	43,5	40,4	9,8	10,6	7,2
14	120	0,109105	0,100733	0,000070	47,4	42,4	24,8	7,7	10,5
15	150	0,094569	0,090493	0,000017	51,1	44,3	46,9	4,3	13,4
16	180	0,081150	0,081701	0,000000	53,0	45,9	50,6	0,7	13,4
17	210	0,069808	0,074073	0,000018	55,3	47,4	63,1	6,1	14,4
18	240	0,060863	0,067409	0,000043	55,3	48,7	43,9	10,8	12,0
19	270	0,053035	0,061558	0,000073	54,7	49,9	23,5	16,1	8,9
20	330	0,041054	0,051854	0,000117	56,8	51,9	24,4	26,3	8,7
21	390	0,033387	0,044252	0,000118	53,9	53,5	0,2	32,5	0,8
22	450	0,027796	0,038254	0,000109	56,5	54,8	3,0	37,6	3,1
23	510	0,024121	0,033495	0,000088	55,3	55,8	0,3	38,9	0,9
24	570	0,020767	0,029699	0,000080	55,8	56,6	0,7	43,0	1,5
25	630	0,018850	0,026657	0,000061	57,6	57,3	0,1	41,4	0,5
26	690	0,017252	0,024208	0,000048	57,6	57,8	0,1	40,3	0,4
27	750	0,016294	0,022230	0,000035	57,0	58,3	1,6	36,4	2,2
28	810	0,015176	0,020624	0,000030	57,0	58,6	2,6	35,9	2,8
29	870	0,014377	0,019317	0,000024	57,6	58,9	1,7	34,4	2,2
30	930	0,013578	0,018249	0,000022	55,5	59,1	13,0	34,4	6,5
31	990	0,013578	0,017372	0,000014	57,3	59,3	3,9	27,9	3,5
32	1050	0,012780	0,016651	0,000015	55,3	59,4	17,0	30,3	7,5
Soma dos erros				0,002431			377,92	18,2	5,0
Variância				0,000078			12,19		
Desvio padrão				0,008856			3,49		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 7x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,17316	0,17316	0,02999	0,02999	0,02999	32	32,0	32,0	1024,0	1024,0	1024,0	32
0,17029	0,17029	0,02900	0,02900	0,02900	Σ(X.Y)	34,8	34,8	1211,0	1211,0	1211,0	Σ(X.Y)
0,16757	0,16309	0,02808	0,02660	0,02733	0,341	33,6	33,3	1129,0	1109,3	1119,1	74353,2
0,16534	0,16534	0,02734	0,02734	0,02734	Σ(X)	33,8	33,8	1142,4	1142,4	1142,4	Σ(X)
0,16342	0,15432	0,02671	0,02382	0,02522	2,735	35,1	34,4	1232,0	1182,2	1206,9	1539,2
0,16102	0,16102	0,02593	0,02593	0,02593	ΣX ²	35,6	35,6	1267,4	1267,4	1267,4	ΣX ²
0,15879	0,14659	0,02521	0,02149	0,02328	0,355	36,0	35,4	1296,0	1251,8	1273,7	76739,6
0,15304	0,13966	0,02342	0,01950	0,02137	(ΣX) ²	38,8	36,3	1505,4	1318,9	1409,1	(ΣX) ²
0,14744	0,13338	0,02174	0,01779	0,01967	7,481	39,2	37,2	1536,6	1384,1	1458,4	2369136,6
0,14201	0,12764	0,02017	0,01629	0,01813	Σ(Y)	42,0	38,0	1764,0	1447,7	1598,0	Σ(Y)
0,13722	0,12235	0,01883	0,01497	0,01679	2,726	42,0	38,9	1764,0	1509,7	1631,9	1489,4
0,13211	0,11744	0,01745	0,01379	0,01552	ΣY ²	42,8	39,6	1831,8	1570,3	1696,1	ΣY ²
0,12620	0,11286	0,01593	0,01274	0,01424	0,330	43,5	40,4	1892,3	1629,6	1756,0	72344,8
0,10911	0,10073	0,01190	0,01015	0,01099	(ΣY) ²	47,4	42,4	2246,8	1799,5	2010,8	(ΣY) ²
0,09457	0,09049	0,00894	0,00819	0,00856	7,431	51,1	44,3	2611,2	1958,2	2261,3	2218280,0
0,08115	0,08170	0,00659	0,00668	0,00663	n.Σ(X.Y)	53,0	45,9	2809,0	2105,8	2432,1	n.Σ(X.Y)
0,06981	0,07407	0,00487	0,00549	0,00517	10,917	55,3	47,4	3058,1	2242,7	2618,8	2379303,7
0,06086	0,06741	0,00370	0,00454	0,00410	n.ΣX ² -(ΣX) ²	55,3	48,7	3058,1	2369,0	2691,6	n.ΣX ² -(ΣX) ²
0,05304	0,06156	0,00281	0,00379	0,00326	3,881	54,7	49,9	2992,1	2485,2	2726,9	86529,3
0,04105	0,05185	0,00169	0,00269	0,00213	n.ΣY ² -(ΣY) ²	56,8	51,9	3226,2	2689,1	2945,5	n.ΣY ² -(ΣY) ²
0,03339	0,04425	0,00111	0,00196	0,00148	3,119	53,9	53,5	2905,2	2858,8	2881,9	96755,0
0,02780	0,03825	0,00077	0,00146	0,00106	r	56,5	54,8	3192,3	2998,9	3094,1	r
0,02412	0,03349	0,00058	0,00112	0,00081	0,995	55,3	55,8	3058,1	3113,7	3085,8	0,949
0,02077	0,02970	0,00043	0,00088	0,00062		55,8	56,6	3113,6	3207,4	3160,2	
0,01885	0,02666	0,00036	0,00071	0,00050		57,6	57,3	3317,8	3283,6	3300,6	
0,01725	0,02421	0,00030	0,00059	0,00042		57,6	57,8	3317,8	3345,3	3331,5	
0,01629	0,02223	0,00027	0,00049	0,00036		57,0	58,3	3249,0	3395,2	3321,3	
0,01518	0,02062	0,00023	0,00043	0,00031		57,0	58,6	3249,0	3435,4	3340,9	
0,01438	0,01932	0,00021	0,00037	0,00028		57,6	58,9	3317,8	3467,8	3392,0	
0,01358	0,01825	0,00018	0,00033	0,00025		55,5	59,1	3080,3	3493,9	3280,6	
0,01358	0,01737	0,00018	0,00030	0,00024		57,3	59,3	3283,3	3514,9	3397,1	
0,01278	0,01665	0,00016	0,00028	0,00021		55,3	59,4	3058,1	3531,8	3286,4	

Distribuição T - Student													
D = 7x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{.95%}	Y _{.95%}					Y	Y _{.95%}	Y _{.95%}
0,173163	0,173163	0,000000	32	0,173163	0,155080	0,191246	32,0	32,0	0,0	32	32,0	24,9	39,1
0,170288	0,170288	0,000000	$\sum(x-y)^2$	0,170288	0,152205	0,188371	34,8	34,8	0,0	$\sum(x-y)^2$	34,8	27,7	41,9
0,167572	0,163088	0,000020	0,002	0,163088	0,149489	0,185655	33,6	33,3	0,1	377,9	33,6	26,5	40,7
0,165335	0,165335	0,000000	GL	0,165335	0,147252	0,183418	33,8	33,8	0,0	GL	33,8	26,7	40,9
0,163419	0,154324	0,000083	31	0,154324	0,145336	0,181502	35,1	34,4	0,5	31	35,1	28,0	42,2
0,161022	0,161022	0,000000	σ^2	0,161022	0,142939	0,179105	35,6	35,6	0,0	σ^2	35,6	28,5	42,7
0,158786	0,146586	0,000149	7,842E-05	0,146586	0,140703	0,176869	36,0	35,4	0,4	12,2	36,0	28,9	43,1
0,153035	0,139658	0,000179	σ	0,139658	0,134952	0,171118	38,8	36,3	6,2	σ	38,8	31,7	45,9
0,147444	0,133383	0,000198	0,01	0,133383	0,129361	0,165527	39,2	37,2	4,0	3,5	39,2	32,1	46,3
0,142013	0,127644	0,000206	Área	0,127644	0,123930	0,160096	42,0	38,0	15,6	Área	42,0	34,9	49,1
0,137220	0,122352	0,000221	0,03	0,122352	0,119137	0,155303	42,0	38,9	9,9	0,03	42,0	34,9	49,1
0,132109	0,117442	0,000215	t($\alpha/2$)	0,117442	0,114026	0,150192	42,8	39,6	10,1	t($\alpha/2$)	42,8	35,7	49,9
0,126198	0,112862	0,000178	2,042	0,112862	0,108115	0,144281	43,5	40,4	9,8	2,04	43,5	36,4	50,6
0,109105	0,100733	0,000070		0,100733	0,091022	0,127188	47,4	42,4	24,8		47,4	40,3	54,5
0,094569	0,090493	0,000017		0,090493	0,076486	0,112652	51,1	44,3	46,9		51,1	44,0	58,2
0,081150	0,081701	0,000000		0,081701	0,063067	0,099233	53,0	45,9	50,6		53,0	45,9	60,1
0,069808	0,074073	0,000018		0,074073	0,051725	0,087891	55,3	47,4	63,1		55,3	48,2	62,4
0,060863	0,067409	0,000043		0,067409	0,042780	0,078946	55,3	48,7	43,9		55,3	48,2	62,4
0,053035	0,061558	0,000073		0,061558	0,034952	0,071118	54,7	49,9	23,5		54,7	47,6	61,8
0,041054	0,051854	0,000117		0,051854	0,022971	0,059137	56,8	51,9	24,4		56,8	49,7	63,9
0,033387	0,044252	0,000118		0,044252	0,015304	0,051470	53,9	53,5	0,2		53,9	46,8	61,0
0,027796	0,038254	0,000109		0,038254	0,009713	0,045879	56,5	54,8	3,0		56,5	49,4	63,6
0,024121	0,033495	0,000088		0,033495	0,006038	0,042204	55,3	55,8	0,3		55,3	48,2	62,4
0,020767	0,029699	0,000080		0,029699	0,002684	0,038850	55,8	56,6	0,7		55,8	48,7	62,9
0,018850	0,026657	0,000061		0,026657	0,000767	0,036933	57,6	57,3	0,1		57,6	50,5	64,7
0,017252	0,024208	0,000048		0,024208	-0,000831	0,035335	57,6	57,8	0,1		57,6	50,5	64,7
0,016294	0,022230	0,000035		0,022230	-0,001789	0,034377	57,0	58,3	1,6		57,0	49,9	64,1
0,015176	0,020624	0,000030		0,020624	-0,002907	0,033259	57,0	58,6	2,6		57,0	49,9	64,1
0,014377	0,019317	0,000024		0,019317	-0,003706	0,032460	57,6	58,9	1,7		57,6	50,5	64,7
0,013578	0,018249	0,000022		0,018249	-0,004505	0,031661	55,5	59,1	13,0		55,5	48,4	62,6
0,013578	0,017372	0,000014		0,017372	-0,004505	0,031661	57,3	59,3	3,9		57,3	50,2	64,4
0,012780	0,016651	0,000015		0,016651	-0,005303	0,030863	55,3	59,4	17,0		55,3	48,2	62,4

Tabelas A3 – Temperatura de Secagem 70°C

Resíduo médio quadrático									
D = 8x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M (%)	Erro_T (%)
1	0	0,170186	0,170186	0,000000	29,8	29,8	0,0	0,0	0,0
2	5	0,167626	0,167626	0,000000	35,7	35,7	0,0	0,0	0,0
3	10	0,165547	0,158714	0,000047	36,7	31,7	25,3	4,1	13,7
4	15	0,162828	0,162828	0,000000	38,6	38,6	0,0	0,0	0,0
5	20	0,160909	0,148909	0,000144	37,6	33,2	19,2	7,5	11,6
6	25	0,158189	0,158189	0,000000	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
7	30	0,155310	0,140365	0,000223	40,3	34,7	31,9	9,6	14,0
8	40	0,148752	0,132791	0,000255	43,2	36,0	51,9	10,7	16,7
9	50	0,141395	0,125982	0,000238	45,2	37,3	62,9	10,9	17,5
10	60	0,137556	0,119792	0,000316	47,8	38,5	86,8	12,9	19,5
11	70	0,131958	0,114116	0,000318	48,7	39,6	82,0	13,5	18,6
12	80	0,126040	0,108873	0,000295	49,4	40,8	74,8	13,6	17,5
13	90	0,120122	0,104005	0,000260	50,9	41,8	82,6	13,4	17,9
14	120	0,103167	0,091214	0,000143	56,7	44,8	142,5	11,6	21,1
15	150	0,086852	0,080549	0,000040	58,5	47,4	123,4	7,3	19,0
16	180	0,073736	0,071508	0,000005	60,1	49,7	107,3	3,0	17,2
17	210	0,062540	0,063769	0,000002	62,7	51,8	117,8	2,0	17,3
18	240	0,054063	0,057100	0,000009	62,2	53,7	71,6	5,6	13,6
19	270	0,046065	0,051330	0,000028	62,2	55,4	45,8	11,4	10,9
20	330	0,034549	0,041955	0,000055	63,2	58,3	23,9	21,4	7,7
21	390	0,026871	0,034818	0,000063	64,3	60,6	13,5	29,6	5,7
22	450	0,021273	0,029340	0,000065	64,1	62,5	2,6	37,9	2,5
23	510	0,017754	0,025109	0,000054	64,5	64,0	0,3	41,4	0,8
24	570	0,014875	0,021820	0,000048	66,0	65,2	0,7	46,7	1,3
25	630	0,013276	0,019249	0,000036	64,5	66,1	2,6	45,0	2,5
26	690	0,011996	0,017230	0,000027	67,0	66,9	0,0	43,6	0,2
27	750	0,011036	0,015636	0,000021	64,7	67,5	7,9	41,7	4,3
28	810	0,010237	0,014371	0,000017	65,6	68,0	5,8	40,4	3,7
29	870	0,009437	0,013362	0,000015	59,9	68,4	72,3	41,6	14,2
30	930	0,009437	0,012555	0,000010	63,5	68,7	27,3	33,0	8,2
31	990	0,008797	0,011905	0,000010	60,5	69,0	71,8	35,3	14,0
Soma dos erros				0,002742			1354,59	19,2	10,0
Variância				0,000091			45,15		
Desvio padrão				0,009561			6,72		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 8x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,17019	0,17019	0,02896	0,02896	0,02896	31	29,8	29,8	888,0	888,0	888,0	31
0,16763	0,16763	0,02810	0,02810	0,02810	∑(X.Y)	35,7	35,7	1274,5	1274,5	1274,5	∑(X.Y)
0,16555	0,15871	0,02741	0,02519	0,02627	0,312	36,7	31,7	1346,9	1003,3	1162,5	84605,9
0,16283	0,16283	0,02651	0,02651	0,02651	∑(X)	38,6	38,6	1490,0	1490,0	1490,0	∑(X)
0,16091	0,14891	0,02589	0,02217	0,02396	2,562	37,6	33,2	1413,8	1103,7	1249,1	1613,6
0,15819	0,15819	0,02502	0,02502	0,02502	∑X ²	40,0	40,0	1600,0	1600,0	1600,0	∑X ²
0,15531	0,14037	0,02412	0,01970	0,02180	0,331	40,3	34,7	1624,1	1200,8	1396,5	90665,1
0,14875	0,13279	0,02213	0,01763	0,01975	(∑X) ²	43,2	36,0	1866,2	1295,9	1555,1	(∑X) ²
0,14140	0,12598	0,01999	0,01587	0,01781	6,566	45,2	37,3	2043,0	1389,2	1684,7	2603705,0
0,13756	0,11979	0,01892	0,01435	0,01648	∑(Y)	47,8	38,5	2284,8	1481,0	1839,5	∑(Y)
0,13196	0,11412	0,01741	0,01302	0,01506	2,485	48,7	39,6	2371,7	1571,5	1930,6	1496,7
0,12604	0,10887	0,01589	0,01185	0,01372	∑Y ²	49,4	40,8	2440,4	1660,6	2013,1	∑Y ²
0,12012	0,10400	0,01443	0,01082	0,01249	0,296	50,9	41,8	2590,8	1748,4	2128,3	79829,5
0,10317	0,09121	0,01064	0,00832	0,00941	(∑Y) ²	56,7	44,8	3214,9	2003,6	2538,0	(∑Y) ²
0,08685	0,08055	0,00754	0,00649	0,00700	6,176	58,5	47,4	3422,3	2245,8	2772,3	2240223,2
0,07374	0,07151	0,00544	0,00511	0,00527	n.∑(X.Y)	60,1	49,7	3612,0	2474,2	2989,4	n.∑(X.Y)
0,06254	0,06377	0,00391	0,00407	0,00399	9,671	62,7	51,8	3931,3	2688,2	3250,9	2622783,0
0,05406	0,05710	0,00292	0,00326	0,00309	n.∑X ² -(∑X) ²	62,2	53,7	3868,8	2887,6	3342,4	n.∑X ² -(∑X) ²
0,04607	0,05133	0,00212	0,00263	0,00236	3,697	62,2	55,4	3868,8	3072,4	3447,7	206912,5
0,03455	0,04196	0,00119	0,00176	0,00145	n.∑Y ² -(∑Y) ²	63,2	58,3	3994,2	3399,9	3685,1	n.∑Y ² -(∑Y) ²
0,02687	0,03482	0,00072	0,00121	0,00094	2,988	64,3	60,6	4134,5	3675,1	3898,0	234490,6
0,02127	0,02934	0,00045	0,00086	0,00062	r	64,1	62,5	4108,8	3903,8	4005,0	r
0,01775	0,02511	0,00032	0,00063	0,00045	0,994	64,5	64,0	4160,3	4092,3	4126,2	0,943
0,01488	0,02182	0,00022	0,00048	0,00032		66,0	65,2	4356,0	4246,8	4301,1	
0,01328	0,01925	0,00018	0,00037	0,00026		64,5	66,1	4160,3	4372,8	4265,2	
0,01200	0,01723	0,00014	0,00030	0,00021		67,0	66,9	4489,0	4475,2	4482,1	
0,01104	0,01564	0,00012	0,00024	0,00017		64,7	67,5	4186,1	4558,1	4368,1	
0,01024	0,01437	0,00010	0,00021	0,00015		65,6	68,0	4303,4	4625,1	4461,3	
0,00944	0,01336	0,00009	0,00018	0,00013		59,9	68,4	3588,0	4679,1	4097,4	
0,00944	0,01255	0,00009	0,00016	0,00012		63,5	68,7	4032,3	4722,6	4363,8	
0,00880	0,01191	0,00008	0,00014	0,00010		60,5	69,0	3660,3	4757,7	4173,0	

Distribuição T - Student													
D = 8x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg.b.s]	M _(Num) [kg/kg.b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}					Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}
0,170186	0,170186	0,000000	31	0,170186	0,150697	0,189675	29,8	29,8	0,0	31	29,8	16,4	43,2
0,167626	0,167626	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,167626	0,148137	0,187115	35,7	35,7	0,0	$\sum(X-Y)^2$	35,7	22,3	49,1
0,165547	0,158714	0,000047	0,003	0,158714	0,146058	0,185036	36,7	31,7	25,3	1282,8	36,7	23,3	50,1
0,162828	0,162828	0,000000	GL	0,162828	0,143339	0,182317	38,6	38,6	0,0	GL	38,6	25,2	52,0
0,160909	0,148909	0,000144	30	0,148909	0,141420	0,180398	37,6	33,2	19,2	30	37,6	24,2	51,0
0,158189	0,158189	0,000000	σ^2	0,158189	0,138700	0,177678	40,0	40,0	0,0	σ^2	40,0	26,6	53,4
0,155310	0,140365	0,000223	9,109E-05	0,140365	0,135821	0,174799	40,3	34,7	31,9	42,8	40,3	26,9	53,7
0,148752	0,132791	0,000255	σ	0,132791	0,129263	0,168241	43,2	36,0	51,9	σ	43,2	29,8	56,6
0,141395	0,125982	0,000238	0,01	0,125982	0,121906	0,160884	45,2	37,3	62,9	6,5	45,2	31,8	58,6
0,137556	0,119792	0,000316	Área	0,119792	0,118067	0,157045	47,8	38,5	86,8	Área	47,8	34,4	61,2
0,131958	0,114116	0,000318	0,03	0,114116	0,112469	0,151447	48,7	39,6	82,0	0,03	48,7	35,3	62,1
0,126040	0,108873	0,000295	t(α/2)	0,108873	0,106551	0,145529	49,4	40,8	74,8	t(α/2)	49,4	36,0	62,8
0,120122	0,104005	0,000260	2,042	0,104005	0,100633	0,139611	50,9	41,8	82,6	2,04	50,9	37,5	64,3
0,103167	0,091214	0,000143		0,091214	0,083678	0,122656	56,7	44,8	142,5		56,7	43,3	70,1
0,086852	0,080549	0,000040		0,080549	0,067363	0,106341	58,5	47,4	123,4		58,5	45,1	71,9
0,073736	0,071508	0,000005		0,071508	0,054247	0,093225	60,1	49,7	107,3		60,1	46,7	73,5
0,062540	0,063769	0,000002		0,063769	0,043051	0,082029	62,7	51,8	117,8		62,7	49,3	76,1
0,054063	0,057100	0,000009		0,057100	0,034574	0,073552	62,2	53,7	71,6		62,2	48,8	75,6
0,046065	0,051330	0,000028		0,051330	0,026576	0,065554	62,2	55,4	45,8		62,2	48,8	75,6
0,034549	0,041955	0,000055		0,041955	0,015060	0,054038	63,2	58,3	23,9		63,2	49,8	76,6
0,026871	0,034818	0,000063		0,034818	0,007382	0,046360	64,3	60,6	13,5		64,3	50,9	77,7
0,021273	0,029340	0,000065		0,029340	0,001784	0,040762	64,1	62,5	2,6		64,1	50,7	77,5
0,017754	0,025109	0,000054		0,025109	-0,001735	0,037243	64,5	64,0	0,3		64,5	51,1	77,9
0,014875	0,021820	0,000048		0,021820	-0,004614	0,034364	66,0	65,2	0,7		66,0	52,6	79,4
0,013276	0,019249	0,000036		0,019249	-0,006213	0,032765	64,5	66,1	2,6		64,5	51,1	77,9
0,011996	0,017230	0,000027		0,017230	-0,007493	0,031485	67,0	66,9	0,0		67,0	53,6	80,4
0,011036	0,015636	0,000021		0,015636	-0,008453	0,030525	64,7	67,5	7,9		64,7	51,3	78,1
0,010237	0,014371	0,000017		0,014371	-0,009252	0,029726	65,6	68,0	5,8		65,6	52,2	79,0
0,009437	0,013362	0,000015		0,013362	-0,010052	0,028926	59,9	68,4	72,3		59,9	46,5	73,3
0,009437	0,012555	0,000010		0,012555	-0,010052	0,028926	63,5	68,7	27,3		63,5	50,1	76,9
0,008797	0,011905	0,000010		0,011905	-0,010692	0,028286	60,5	69,0	71,8		60,5	47,1	73,9

Tabelas A3 – Temperatura de Secagem 80°C

Resíduo médio quadrático									
D = 9x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M (%)	Erro_T (%)
1	0	0,172723	0,172723	0,000000	30,5	30,5	0,0	0,0	0,0
2	5	0,168881	0,168881	0,000000	35,3	35,3	0,0	0,0	0,0
3	10	0,166960	0,159567	0,000055	34,6	32,8	3,2	4,4	5,2
4	15	0,164239	0,164239	0,000000	35,3	35,3	0,0	0,0	0,0
5	20	0,161357	0,148510	0,000165	35,2	34,7	0,2	8,0	1,4
6	25	0,159116	0,159116	0,000000	35,3	35,3	0,0	0,0	0,0
7	30	0,156395	0,138992	0,000303	35,3	36,5	1,4	11,1	3,3
8	40	0,149832	0,130629	0,000369	37,2	38,1	0,9	12,8	2,5
9	50	0,141988	0,123162	0,000354	40,0	39,7	0,1	13,3	0,7
10	60	0,135425	0,116412	0,000362	41,1	41,2	0,0	14,0	0,2
11	70	0,127901	0,110251	0,000312	44,4	42,6	3,2	13,8	4,0
12	80	0,120698	0,104585	0,000260	44,7	44,0	0,5	13,3	1,6
13	90	0,114775	0,099346	0,000238	45,0	45,3	0,1	13,4	0,7
14	120	0,093005	0,085691	0,000053	54,7	48,9	33,4	7,9	10,6
15	150	0,075876	0,074446	0,000002	54,3	52,2	4,6	1,9	3,9
16	180	0,061630	0,065040	0,000012	60,8	55,1	33,0	5,5	9,5
17	210	0,050584	0,057099	0,000042	61,7	57,6	16,4	12,9	6,6
18	240	0,041300	0,050353	0,000082	67,8	60,0	61,3	21,9	11,5
19	270	0,032816	0,044598	0,000139	65,5	62,1	11,8	35,9	5,3
20	330	0,024972	0,035442	0,000110	67,0	65,6	1,9	41,9	2,1
21	390	0,018249	0,028662	0,000108	69,8	68,5	1,8	57,1	1,9
22	450	0,014567	0,023598	0,000082	70,1	70,7	0,4	62,0	0,9
23	510	0,012166	0,019786	0,000058	71,0	72,6	2,5	62,6	2,2
24	570	0,009925	0,016896	0,000049	70,8	74,0	10,6	70,2	4,6
25	630	0,009124	0,014691	0,000031	70,4	75,2	23,3	61,0	6,9
26	690	0,008004	0,012997	0,000025	73,1	76,2	9,5	62,4	4,2
27	750	0,007684	0,011689	0,000016	73,1	76,9	14,7	52,1	5,3
28	810	0,007203	0,010672	0,000012	72,0	77,5	30,8	48,2	7,7
29	870	0,006563	0,009878	0,000011	71,6	78,0	41,4	50,5	9,0
30	930	0,006563	0,009253	0,000007	71,6	78,4	46,6	41,0	9,5
Soma dos erros				0,003255			353,59	26,6	4,0
Variância				0,000112			12,19		
Desvio padrão				0,010595			3,49		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 9x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,17272	0,17272	0,02983	0,02983	0,02983	30	30,5	30,5	930,3	930,2	930,2	30
0,16888	0,16888	0,02852	0,02852	0,02852	$\sum(X.Y)$	35,3	35,3	1246,1	1246,1	1246,1	$\sum(X.Y)$
0,16696	0,15957	0,02788	0,02546	0,02664	0,301	34,6	32,8	1197,2	1076,4	1135,2	97256,088
0,16424	0,16424	0,02697	0,02697	0,02697	$\sum(X)$	35,3	35,3	1246,1	1246,1	1246,1	$\sum(X)$
0,16136	0,14851	0,02604	0,02206	0,02396	2,421	35,2	34,7	1239,0	1205,0	1221,9	1639,200
0,15912	0,15912	0,02532	0,02532	0,02532	$\sum X^2$	35,3	35,3	1246,1	1246,1	1246,1	$\sum X^2$
0,15640	0,13899	0,02446	0,01932	0,02174	0,319	35,3	36,5	1246,1	1330,5	1287,6	96758,700
0,14983	0,13063	0,02245	0,01706	0,01957	$(\sum X)^2$	37,2	38,1	1383,8	1454,0	1418,5	$(\sum X)^2$
0,14199	0,12316	0,02016	0,01517	0,01749	5,859	40,0	39,7	1600,0	1576,1	1588,0	2686976,640
0,13543	0,11641	0,01834	0,01355	0,01577	$\sum(Y)$	41,1	41,2	1689,2	1696,9	1693,0	$\sum(Y)$
0,12790	0,11025	0,01636	0,01216	0,01410	2,367	44,4	42,6	1971,4	1816,4	1892,3	1640,916
0,12070	0,10459	0,01457	0,01094	0,01262	$\sum Y^2$	44,7	44,0	1998,1	1934,6	1966,1	$\sum Y^2$
0,11478	0,09935	0,01317	0,00987	0,01140	0,285	45,0	45,3	2025,0	2051,5	2038,2	98107,066
0,09301	0,08569	0,00865	0,00734	0,00797	$(\sum Y)^2$	54,7	48,9	2992,1	2393,5	2676,1	$(\sum Y)^2$
0,07588	0,07445	0,00576	0,00554	0,00565	5,604	54,3	52,2	2948,5	2720,6	2832,2	2692606,845
0,06163	0,06504	0,00380	0,00423	0,00401	$n \cdot \sum(X.Y)$	60,8	55,1	3696,6	3031,0	3347,3	$n \cdot \sum(X.Y)$
0,05058	0,05710	0,00256	0,00326	0,00289	9,021	61,7	57,6	3806,9	3323,3	3556,9	2917682,640
0,04130	0,05035	0,00171	0,00254	0,00208	$n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2$	67,8	60,0	4596,8	3596,8	4066,2	$n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2$
0,03282	0,04460	0,00108	0,00199	0,00146	3,722	65,5	62,1	4290,3	3851,3	4064,8	215784,360
0,02497	0,03544	0,00062	0,00126	0,00089	$n \cdot \sum Y^2 - (\sum Y)^2$	67,0	65,6	4489,0	4303,9	4395,5	$n \cdot \sum Y^2 - (\sum Y)^2$
0,01825	0,02866	0,00033	0,00082	0,00052	2,954	69,8	68,5	4872,0	4685,8	4778,0	250605,130
0,01457	0,02360	0,00021	0,00056	0,00034	r	70,1	70,7	4914,0	5004,2	4958,9	r
0,01217	0,01979	0,00015	0,00039	0,00024	0,992	71,0	72,6	5041,0	5267,4	5152,9	0,980
0,00993	0,01690	0,00010	0,00029	0,00017		70,8	74,0	5012,6	5483,4	5242,7	
0,00912	0,01469	0,00008	0,00022	0,00013		70,4	75,2	4956,2	5659,8	5296,3	
0,00800	0,01300	0,00006	0,00017	0,00010		73,1	76,2	5343,6	5803,2	5568,7	
0,00768	0,01169	0,00006	0,00014	0,00009		73,1	76,9	5343,6	5919,5	5624,2	
0,00720	0,01067	0,00005	0,00011	0,00008		72,0	77,5	5184,0	6013,5	5583,4	
0,00656	0,00988	0,00004	0,00010	0,00006		71,6	78,0	5126,6	6089,4	5587,3	
0,00656	0,00925	0,00004	0,00009	0,00006		71,6	78,4	5126,6	6150,6	5615,3	

Distribuição T - Student													
D = 9x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95 %			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95 %		
				Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}					Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}
0,172723	0,172723	0,000000	30	0,172723	0,151088	0,194358	30,5	30,5	0,0	30	30,5	23,4	37,6
0,168881	0,168881	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,168881	0,147246	0,190516	35,3	35,3	0,0	$\sum(X-Y)^2$	35,3	28,2	42,4
0,166960	0,159567	0,000055	0,003	0,159567	0,145325	0,188595	34,6	32,8	3,2	353,6	34,6	27,5	41,7
0,164239	0,164239	0,000000	GL	0,164239	0,142604	0,185874	35,3	35,3	0,0	GL	35,3	28,2	42,4
0,161357	0,148510	0,000165	29	0,148510	0,139722	0,182992	35,2	34,7	0,2	29	35,2	28,1	42,3
0,159116	0,159116	0,000000	σ^2	0,159116	0,137481	0,180751	35,3	35,3	0,0	σ^2	35,3	28,2	42,4
0,156395	0,138992	0,000303	0,000112	0,138992	0,134760	0,178030	35,3	36,5	1,4	12,2	35,3	28,2	42,4
0,149832	0,130629	0,000369	σ	0,130629	0,128197	0,171467	37,2	38,1	0,9	σ	37,2	30,1	44,3
0,141988	0,123162	0,000354	0,01	0,123162	0,120353	0,163623	40,0	39,7	0,1	3,5	40,0	32,9	47,1
0,135425	0,116412	0,000362	Área	0,116412	0,113790	0,157060	41,1	41,2	0,0	Área	41,1	34,0	48,2
0,127901	0,110251	0,000312	0,03	0,110251	0,106266	0,149536	44,4	42,6	3,2	0,03	44,4	37,3	51,5
0,120698	0,104585	0,000260	t($\alpha/2$)	0,104585	0,099063	0,142333	44,7	44,0	0,5	t($\alpha/2$)	44,7	37,6	51,8
0,114775	0,099346	0,000238	2,042	0,099346	0,093140	0,136410	45,0	45,3	0,1	2,04	45,0	37,9	52,1
0,093005	0,085691	0,000053		0,085691	0,071370	0,114640	54,7	48,9	33,4		54,7	47,6	61,8
0,075876	0,074446	0,000002		0,074446	0,054241	0,097511	54,3	52,2	4,6		54,3	47,2	61,4
0,061630	0,065040	0,000012		0,065040	0,039995	0,083265	60,8	55,1	33,0		60,8	53,7	67,9
0,050584	0,057099	0,000042		0,057099	0,028949	0,072219	61,7	57,6	16,4		61,7	54,6	68,8
0,041300	0,050353	0,000082		0,050353	0,019665	0,062935	67,8	60,0	61,3		67,8	60,7	74,9
0,032816	0,044598	0,000139		0,044598	0,011181	0,054451	65,5	62,1	11,8		65,5	58,4	72,6
0,024972	0,035442	0,000110		0,035442	0,003337	0,046607	67,0	65,6	1,9		67,0	59,9	74,1
0,018249	0,028662	0,000108		0,028662	-0,003386	0,039884	69,8	68,5	1,8		69,8	62,7	76,9
0,014567	0,023598	0,000082		0,023598	-0,007068	0,036202	70,1	70,7	0,4		70,1	63,0	77,2
0,012166	0,019786	0,000058		0,019786	-0,009469	0,033801	71,0	72,6	2,5		71,0	63,9	78,1
0,009925	0,016896	0,000049		0,016896	-0,011710	0,031560	70,8	74,0	10,6		70,8	63,7	77,9
0,009124	0,014691	0,000031		0,014691	-0,012511	0,030759	70,4	75,2	23,3		70,4	63,3	77,5
0,008004	0,012997	0,000025		0,012997	-0,013631	0,029639	73,1	76,2	9,5		73,1	66,0	80,2
0,007684	0,011689	0,000016		0,011689	-0,013951	0,029319	73,1	76,9	14,7		73,1	66,0	80,2
0,007203	0,010672	0,000012		0,010672	-0,014432	0,028838	72,0	77,5	30,8		72,0	64,9	79,1
0,006563	0,009878	0,000011		0,009878	-0,015072	0,028198	71,6	78,0	41,4		71,6	64,5	78,7
0,006563	0,009253	0,000007		0,009253	-0,015072	0,028198	71,6	78,4	46,6		71,6	64,5	78,7

Tabelas A4 – Temperatura de Secagem 90°C

Resíduo médio quadrático									
D = 10x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M (%)	Erro_T (%)
1	0	0,167900	0,167900	0,000000	27,6	27,6	0,0	0,0	0,0
2	5	0,164522	0,164522	0,000000	32,3	32,3	0,0	0,0	0,0
3	10	0,162432	0,153678	0,000077	33,1	30,5	6,7	5,4	7,8
4	15	0,160180	0,160180	0,000000	33,8	33,8	0,0	0,0	0,0
5	20	0,157446	0,141920	0,000241	34,6	32,9	2,8	9,9	4,9
6	25	0,155516	0,155516	0,000000	33,7	33,7	0,0	0,0	0,0
7	30	0,153104	0,131913	0,000449	35,4	35,1	0,1	13,8	0,8
8	40	0,146671	0,123190	0,000551	39,2	37,2	3,9	16,0	5,0
9	50	0,139916	0,115449	0,000599	40,7	39,2	2,3	17,5	3,7
10	60	0,131071	0,108486	0,000510	40,5	41,1	0,3	17,2	1,4
11	70	0,124960	0,102160	0,000520	44,6	42,9	3,0	18,2	3,9
12	80	0,118688	0,096367	0,000498	44,6	44,6	0,0	18,8	0,0
13	90	0,113059	0,091031	0,000485	43,2	46,2	9,3	19,5	7,1
14	120	0,091348	0,077237	0,000199	49,4	50,8	2,0	15,4	2,9
15	150	0,073175	0,066023	0,000051	61,7	54,9	46,2	9,8	11,0
16	180	0,059022	0,056769	0,000005	65,5	58,6	48,3	3,8	10,6
17	210	0,047925	0,049065	0,000001	67,4	61,8	31,1	2,4	8,3
18	240	0,039080	0,042615	0,000012	70,2	64,8	29,7	9,0	7,8
19	270	0,032326	0,037189	0,000024	72,1	67,4	22,2	15,0	6,5
20	330	0,021872	0,028733	0,000047	77,0	71,9	26,5	31,4	6,7
21	390	0,015761	0,022641	0,000047	79,8	75,4	19,0	43,7	5,5
22	450	0,012062	0,018208	0,000038	79,0	78,3	0,5	51,0	0,9
23	510	0,009649	0,014953	0,000028	78,7	80,6	3,8	55,0	2,5
24	570	0,007880	0,012544	0,000022	81,2	82,5	1,7	59,2	1,6
25	630	0,006915	0,010747	0,000015	78,6	84,0	29,0	55,4	6,9
26	690	0,005950	0,009397	0,000012	81,5	85,2	13,6	57,9	4,5
27	750	0,005950	0,008374	0,000006	80,6	86,1	30,7	40,7	6,9
28	810	0,005146	0,007595	0,000006	81,2	86,9	32,6	47,6	7,0
29	870	0,004825	0,006997	0,000005	80,6	87,5	47,9	45,0	8,6
30	930	0,004664	0,006535	0,000004	78,1	88,0	98,3	40,1	12,7
Soma dos erros				0,004452			511,38	24,0	4,8
Variância				0,000154			17,63		
Desvio padrão				0,012390			4,20		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 10x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,16790	0,16790	0,02819	0,02819	0,02819	30	27,6	27,6	761,8	761,8	761,8	30
0,16452	0,16452	0,02707	0,02707	0,02707	Σ(X.Y)	32,3	32,3	1043,3	1043,3	1043,3	Σ(X.Y)
0,16243	0,15368	0,02638	0,02362	0,02496	0,278	33,1	30,5	1095,6	930,8	1009,9	113656,0
0,16018	0,16018	0,02566	0,02566	0,02566	Σ(X)	33,8	33,8	1142,4	1142,4	1142,4	Σ(X)
0,15745	0,14192	0,02479	0,02014	0,02234	2,339	34,6	32,9	1197,2	1083,2	1138,7	1745,9
0,15552	0,15552	0,02419	0,02419	0,02419	ΣX ²	33,7	33,7	1135,7	1135,7	1135,7	ΣX ²
0,15310	0,13191	0,02344	0,01740	0,02020	0,304	35,4	35,1	1253,2	1234,4	1243,7	113344,9
0,14667	0,12319	0,02151	0,01518	0,01807	(ΣX) ²	39,2	37,2	1536,6	1385,4	1459,1	(ΣX) ²
0,13992	0,11545	0,01958	0,01333	0,01615	5,471	40,7	39,2	1656,5	1536,5	1595,3	3048166,8
0,13107	0,10849	0,01718	0,01177	0,01422	Σ(Y)	40,5	41,1	1640,3	1687,5	1663,7	Σ(Y)
0,12496	0,10216	0,01562	0,01044	0,01277	2,188	44,6	42,9	1989,2	1838,5	1912,3	1741,9
0,11869	0,09637	0,01409	0,00929	0,01144	ΣY ²	44,6	44,6	1989,2	1989,0	1989,1	ΣY ²
0,11306	0,09103	0,01278	0,00829	0,01029	0,256	43,2	46,2	1866,2	2139,0	1997,9	114478,4
0,09135	0,07724	0,00834	0,00597	0,00706	(ΣY) ²	49,4	50,8	2440,4	2583,1	2510,7	(ΣY) ²
0,07318	0,06602	0,00535	0,00436	0,00483	4,787	61,7	54,9	3806,9	3014,4	3387,6	3034362,7
0,05902	0,05677	0,00348	0,00322	0,00335	n.Σ(X.Y)	65,5	58,6	4290,3	3428,5	3835,2	n.Σ(X.Y)
0,04793	0,04907	0,00230	0,00241	0,00235	8,332	67,4	61,8	4542,8	3822,1	4166,9	3409678,7
0,03908	0,04261	0,00153	0,00182	0,00167	n.ΣX ² -(ΣX) ²	70,2	64,8	4928,0	4193,2	4545,8	n.ΣX ² -(ΣX) ²
0,03233	0,03719	0,00104	0,00138	0,00120	3,641	72,1	67,4	5198,4	4540,5	4858,3	352180,5
0,02187	0,02873	0,00048	0,00083	0,00063	n.ΣY ² -(ΣY) ²	77,0	71,9	5929,0	5162,8	5532,6	n.ΣY ² -(ΣY) ²
0,01576	0,02264	0,00025	0,00051	0,00036	2,898	79,8	75,4	6368,0	5691,7	6020,4	399988,9
0,01206	0,01821	0,00015	0,00033	0,00022	r	79,0	78,3	6241,0	6135,2	6187,9	r
0,00965	0,01495	0,00009	0,00022	0,00014	0,989	78,7	80,6	6193,7	6503,1	6346,5	0,982
0,00788	0,01254	0,00006	0,00016	0,00010		81,2	82,5	6593,4	6806,1	6698,9	
0,00692	0,01075	0,00005	0,00012	0,00007		78,6	84,0	6178,0	7054,1	6601,5	
0,00595	0,00940	0,00004	0,00009	0,00006		81,5	85,2	6642,3	7256,1	6942,4	
0,00595	0,00837	0,00004	0,00007	0,00005		80,6	86,1	6496,4	7420,2	6942,9	
0,00515	0,00760	0,00003	0,00006	0,00004		81,2	86,9	6593,4	7553,0	7056,9	
0,00483	0,00700	0,00002	0,00005	0,00003		80,6	87,5	6496,4	7660,2	7054,3	
0,00466	0,00653	0,00002	0,00004	0,00003		78,1	88,0	6099,6	7746,7	6874,0	

Distribuição T - Student													
D = 10x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg.b.s]	M _(Num) [kg/kg.b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}					Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}
0,167900	0,167900	0,000000	30	0,167900	0,142625	0,193175	27,6	27,6	0,0	30	27,6	19,0	36,2
0,164522	0,164522	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,164522	0,139247	0,189797	32,3	32,3	0,0	$\sum(X-Y)^2$	32,3	23,7	40,9
0,162432	0,153678	0,000077	0,004	0,153678	0,137157	0,187707	33,1	30,5	6,7	511,4	33,1	24,5	41,7
0,160180	0,160180	0,000000	GL	0,160180	0,134905	0,185455	33,8	33,8	0,0	GL	33,8	25,2	42,4
0,157446	0,141920	0,000241	29	0,141920	0,132171	0,182721	34,6	32,9	2,8	29	34,6	26,0	43,2
0,155516	0,155516	0,000000	σ^2	0,155516	0,130241	0,180791	33,7	33,7	0,0	σ^2	33,7	25,1	42,3
0,153104	0,131913	0,000449	0,0001535	0,131913	0,127829	0,178379	35,4	35,1	0,1	17,6	35,4	26,8	44,0
0,146671	0,123190	0,000551	σ	0,123190	0,121396	0,171946	39,2	37,2	3,9	σ	39,2	30,6	47,8
0,139916	0,115449	0,000599	0,01	0,115449	0,114641	0,165191	40,7	39,2	2,3	4,2	40,7	32,1	49,3
0,131071	0,108486	0,000510	Área	0,108486	0,105796	0,156346	40,5	41,1	0,3	Área	40,5	31,9	49,1
0,124960	0,102160	0,000520	0,03	0,102160	0,099685	0,150235	44,6	42,9	3,0	0,03	44,6	36,0	53,2
0,118688	0,096367	0,000498	t(α/2)	0,096367	0,093413	0,143963	44,6	44,6	0,0	t(α/2)	44,6	36,0	53,2
0,113059	0,091031	0,000485	2,04	0,091031	0,087784	0,138334	43,2	46,2	9,3	2,04	43,2	34,6	51,8
0,091348	0,077237	0,000199		0,077237	0,066073	0,116623	49,4	50,8	2,0		49,4	40,8	58,0
0,073175	0,066023	0,000051		0,066023	0,047900	0,098450	61,7	54,9	46,2		61,7	53,1	70,3
0,059022	0,056769	0,000005		0,056769	0,033747	0,084297	65,5	58,6	48,3		65,5	56,9	74,1
0,047925	0,049065	0,000001		0,049065	0,022650	0,073200	67,4	61,8	31,1		67,4	58,8	76,0
0,039080	0,042615	0,000012		0,042615	0,013805	0,064355	70,2	64,8	29,7		70,2	61,6	78,8
0,032326	0,037189	0,000024		0,037189	0,007051	0,057601	72,1	67,4	22,2		72,1	63,5	80,7
0,021872	0,028733	0,000047		0,028733	-0,003403	0,047147	77,0	71,9	26,5		77,0	68,4	85,6
0,015761	0,022641	0,000047		0,022641	-0,009514	0,041036	79,8	75,4	19,0		79,8	71,2	88,4
0,012062	0,018208	0,000038		0,018208	-0,013213	0,037337	79,0	78,3	0,5		79,0	70,4	87,6
0,009649	0,014953	0,000028		0,014953	-0,015626	0,034924	78,7	80,6	3,8		78,7	70,1	87,3
0,007880	0,012544	0,000022		0,012544	-0,017395	0,033155	81,2	82,5	1,7		81,2	72,6	89,8
0,006915	0,010747	0,000015		0,010747	-0,018360	0,032190	78,6	84,0	29,0		78,6	70,0	87,2
0,005950	0,009397	0,000012		0,009397	-0,019325	0,031225	81,5	85,2	13,6		81,5	72,9	90,1
0,005950	0,008374	0,000006		0,008374	-0,019325	0,031225	80,6	86,1	30,7		80,6	72,0	89,2
0,005146	0,007595	0,000006		0,007595	-0,020129	0,030421	81,2	86,9	32,6		81,2	72,6	89,8
0,004825	0,006997	0,000005		0,006997	-0,020450	0,030100	80,6	87,5	47,9		80,6	72,0	89,2
0,004664	0,006535	0,000004		0,006535	-0,020611	0,029939	78,1	88,0	98,3		78,1	69,5	86,7

Tabelas A5 – Temperatura de Secagem 100°C

Resíduo médio quadrático									
D = 12x10⁻¹⁰ [m²/s]									
N	t [min]	M_(Exp) [kg/kg,b.s]	M_(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T_(Exp) [°C]	T_(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M(%)	Erro_T(%)
1	0	0,169366	0,169366	0,000000	27,5	27,5	0,0	0,0	0,0
2	5	0,165838	0,165838	0,000000	35,5	35,5	0,0	0,0	0,0
3	10	0,163913	0,152225	0,000137	35,8	30,9	24,2	7,1	13,7
4	15	0,161187	0,161187	0,000000	37,5	37,5	0,0	0,0	0,0
5	20	0,157979	0,138487	0,000380	38,5	33,7	23,3	12,3	12,5
6	25	0,154611	0,154611	0,000000	39,2	39,2	0,0	0,0	0,0
7	30	0,151243	0,127030	0,000586	40,0	36,3	14,0	16,0	9,4
8	40	0,141941	0,117183	0,000613	42,6	38,7	15,4	17,4	9,2
9	50	0,133119	0,108539	0,000604	43,7	41,0	7,4	18,5	6,2
10	60	0,124940	0,100835	0,000581	45,9	43,2	7,5	19,3	6,0
11	70	0,115156	0,093894	0,000452	47,4	45,2	4,6	18,5	4,5
12	80	0,108260	0,087590	0,000427	49,0	47,2	3,1	19,1	3,6
13	90	0,096391	0,081831	0,000212	49,7	49,2	0,3	15,1	1,1
14	120	0,074579	0,067184	0,000055	58,3	54,5	14,6	9,9	6,5
15	150	0,057257	0,055591	0,000003	62,3	59,2	9,5	2,9	4,9
16	180	0,043304	0,046289	0,000009	71,8	63,5	69,5	6,9	11,6
17	210	0,032237	0,038763	0,000043	83,0	67,3	247,7	20,2	19,0
18	240	0,025020	0,032638	0,000058	76,5	70,7	34,0	30,4	7,6
19	270	0,020048	0,027630	0,000057	74,2	73,7	0,2	37,8	0,6
20	330	0,012510	0,020130	0,000058	87,1	78,9	67,0	60,9	9,4
21	390	0,008180	0,015003	0,000047	92,7	83,1	92,4	83,4	10,4
22	450	0,006095	0,011455	0,000029	93,0	86,4	43,1	87,9	7,1
23	510	0,004330	0,008971	0,000022	91,6	89,1	6,1	107,2	2,7
24	570	0,003528	0,007212	0,000014	93,8	91,3	6,3	104,4	2,7
25	630	0,003208	0,005955	0,000008	94,3	93,0	1,6	85,6	1,4
26	690	0,002566	0,005046	0,000006	94,6	94,4	0,0	96,6	0,2
27	750	0,002245	0,004383	0,000005	95,2	95,5	0,1	95,2	0,3
Soma dos erros				0,004404			691,95	36,0	5,6
Variância				0,000169			26,61		
Desvio padrão				0,013014			5,16		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 12x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,16937	0,16937	0,02868	0,02869	0,02868	27	27,5	27,5	756,3	756,2	756,2	27
0,16584	0,16584	0,02750	0,02750	0,02750	Σ(X.Y)	35,5	35,5	1260,3	1260,3	1260,3	Σ(X.Y)
0,16391	0,15223	0,02687	0,02317	0,02495	0,257	35,8	30,9	1281,6	953,6	1105,5	115152,3
0,16119	0,16119	0,02598	0,02598	0,02598	Σ(X)	37,5	37,5	1406,3	1406,3	1406,3	Σ(X)
0,15798	0,13849	0,02496	0,01918	0,02188	2,139	38,5	33,7	1482,3	1133,8	1296,4	1700,7
0,15461	0,15461	0,02390	0,02390	0,02390	ΣX ²	39,2	39,2	1536,6	1536,6	1536,6	ΣX ²
0,15124	0,12703	0,02287	0,01614	0,01921	0,282	40,0	36,3	1600,0	1314,3	1450,1	121877,1
0,14194	0,11718	0,02015	0,01373	0,01663	(ΣX) ²	42,6	38,7	1814,8	1496,0	1647,7	(ΣX) ²
0,13312	0,10854	0,01772	0,01178	0,01445	4,576	43,7	41,0	1909,7	1679,0	1790,6	2892380,5
0,12494	0,10083	0,01561	0,01017	0,01260	Σ(Y)	45,9	43,2	2106,8	1862,9	1981,1	Σ(Y)
0,11516	0,09389	0,01326	0,00882	0,01081	2,005	47,4	45,2	2246,8	2047,6	2144,8	1605,6
0,10826	0,08759	0,01172	0,00767	0,00948	ΣY ²	49,0	47,2	2401,0	2232,5	2315,2	ΣY ²
0,09639	0,08183	0,00929	0,00670	0,00789	0,237	49,7	49,2	2470,1	2417,4	2443,6	109119,5
0,07458	0,06718	0,00556	0,00451	0,00501	(ΣY) ²	58,3	54,5	3398,9	2968,4	3176,4	(ΣY) ²
0,05726	0,05559	0,00328	0,00309	0,00318	4,019	62,3	59,2	3881,3	3507,4	3689,6	2577941,7
0,04330	0,04629	0,00188	0,00214	0,00200	n.Σ(X.Y)	71,8	63,5	5155,2	4027,6	4556,7	n.Σ(X.Y)
0,03224	0,03876	0,00104	0,00150	0,00125	6,948	83,0	67,3	6889,0	4524,3	5582,8	3109112,8
0,02502	0,03264	0,00063	0,00107	0,00082	n.ΣX ² -(ΣX) ²	76,5	70,7	5852,3	4994,0	5406,1	n.ΣX ² -(ΣX) ²
0,02005	0,02763	0,00040	0,00076	0,00055	3,028	74,2	73,7	5505,6	5435,0	5470,2	398300,9
0,01251	0,02013	0,00016	0,00041	0,00025	n.ΣY ² -(ΣY) ²	87,1	78,9	7586,4	6227,6	6873,5	n.ΣY ² -(ΣY) ²
0,00818	0,01500	0,00007	0,00023	0,00012	2,392	92,7	83,1	8593,3	6903,5	7702,2	368285,004
0,00610	0,01145	0,00004	0,00013	0,00007	r	93,0	86,4	8649,0	7471,5	8038,7	r
0,00433	0,00897	0,00002	0,00008	0,00004	0,988	91,6	89,1	8390,6	7943,7	8164,1	0,988
0,00353	0,00721	0,00001	0,00005	0,00003		93,8	91,3	8798,4	8333,0	8562,5	
0,00321	0,00595	0,00001	0,00004	0,00002		94,3	93,0	8892,5	8651,9	8771,4	
0,00257	0,00505	0,00001	0,00003	0,00001		94,6	94,4	8949,2	8912,0	8930,6	
0,00225	0,00438	0,00001	0,00002	0,00001		95,2	95,5	9063,0	9123,2	9093,1	

Distribuição T - Student													
D = 12x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg.b.s]	M _(Num) [kg/kg.b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}					Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}
0,169366	0,169366	0,000000	27	0,169366	0,142817	0,195915	27,5	27,5	0,0	27	27,5	17,0	38,0
0,165838	0,165838	0,000000	∑(X-Y) ²	0,165838	0,139289	0,192387	35,5	35,5	0,0	∑(X-Y) ²	35,5	25,0	46,0
0,163913	0,152225	0,000137	0,004	0,152225	0,137364	0,190462	35,8	30,9	24,2	691,9	35,8	25,3	46,3
0,161187	0,161187	0,000000	GL	0,161187	0,134638	0,187736	37,5	37,5	0,0	GL	37,5	27,0	48,0
0,157979	0,138487	0,000380	26	0,138487	0,131430	0,184528	38,5	33,7	23,3	26	38,5	28,0	49,0
0,154611	0,154611	0,000000	σ ²	0,154611	0,128062	0,181160	39,2	39,2	0,0	σ ²	39,2	28,7	49,7
0,151243	0,127030	0,000586	0,0001694	0,127030	0,124694	0,177792	40,0	36,3	14,0	26,6	40,0	29,5	50,5
0,141941	0,117183	0,000613	σ	0,117183	0,115392	0,168490	42,6	38,7	15,4	σ	42,6	32,1	53,1
0,133119	0,108539	0,000604	0,01	0,108539	0,106570	0,159668	43,7	41,0	7,4	5,2	43,7	33,2	54,2
0,124940	0,100835	0,000581	Área	0,100835	0,098391	0,151489	45,9	43,2	7,5	Área	45,9	35,4	56,4
0,115156	0,093894	0,000452	0,03	0,093894	0,088607	0,141705	47,4	45,2	4,6	0,03	47,4	36,9	57,9
0,108260	0,087590	0,000427	t(α/2)	0,087590	0,081711	0,134809	49,0	47,2	3,1	t(α/2)	49,0	38,5	59,5
0,096391	0,081831	0,000212	2,04	0,081831	0,069842	0,122940	49,7	49,2	0,3	2,04	49,7	39,2	60,2
0,074579	0,067184	0,000055		0,067184	0,048030	0,101128	58,3	54,5	14,6		58,3	47,8	68,8
0,057257	0,055591	0,000003		0,055591	0,030708	0,083806	62,3	59,2	9,5		62,3	51,8	72,8
0,043304	0,046289	0,000009		0,046289	0,016755	0,069853	71,8	63,5	69,5		71,8	61,3	82,3
0,032237	0,038763	0,000043		0,038763	0,005688	0,058786	83,0	67,3	247,7		83,0	72,5	93,5
0,025020	0,032638	0,000058		0,032638	-0,001529	0,051569	76,5	70,7	34,0		76,5	66,0	87,0
0,020048	0,027630	0,000057		0,027630	-0,006501	0,046597	74,2	73,7	0,2		74,2	63,7	84,7
0,012510	0,020130	0,000058		0,020130	-0,014039	0,039059	87,1	78,9	67,0		87,1	76,6	97,6
0,008180	0,015003	0,000047		0,015003	-0,018369	0,034729	92,7	83,1	92,4		92,7	82,2	103,2
0,006095	0,011455	0,000029		0,011455	-0,020454	0,032644	93,0	86,4	43,1		93,0	82,5	103,5
0,004330	0,008971	0,000022		0,008971	-0,022219	0,030879	91,6	89,1	6,1		91,6	81,1	102,1
0,003528	0,007212	0,000014		0,007212	-0,023021	0,030077	93,8	91,3	6,3		93,8	83,3	104,3
0,003208	0,005955	0,000008		0,005955	-0,023341	0,029757	94,3	93,0	1,6		94,3	83,8	104,8
0,002566	0,005046	0,000006		0,005046	-0,023983	0,029115	94,6	94,4	0,0		94,6	84,1	105,1
0,002245	0,004383	0,000005		0,004383	-0,024304	0,028794	95,2	95,5	0,1		95,2	84,7	105,7

Secagem do tijolo compensador em estufa

Tabelas A6 – Temperatura de Secagem 50°C

Resíduo médio quadrático									
D = 10x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro _M (%)	Erro _T (%)
1	0	0,172319	0,172319	0,000000	31,5	31,5	0,0	0,0	0,0
2	5	0,169412	0,169412	0,000000	33,5	33,5	0,0	0,0	0,0
3	10	0,167636	0,163786	0,000015	33,6	35,1	2,3	2,3	4,5
4	15	0,165213	0,165213	0,000000	34,7	34,7	0,0	0,0	0,0
5	20	0,162952	0,156454	0,000042	34,2	37,1	8,6	4,0	8,6
6	25	0,160207	0,160207	0,000000	36,0	36,0	0,0	0,0	0,0
7	30	0,157784	0,149957	0,000061	35,7	38,6	8,6	5,0	8,2
8	40	0,153101	0,144093	0,000081	37,7	39,8	4,6	5,9	5,7
9	50	0,147933	0,138728	0,000085	38,4	40,8	5,9	6,2	6,3
10	60	0,142603	0,133771	0,000078	40,3	41,7	1,9	6,2	3,4
11	70	0,138081	0,129154	0,000080	38,8	42,4	13,2	6,5	9,4
12	80	0,133398	0,124829	0,000073	39,6	43,1	12,1	6,4	8,8
13	90	0,129845	0,120755	0,000083	40,3	43,7	11,3	7,0	8,4
14	120	0,117571	0,109771	0,000061	42,5	45,1	6,7	6,6	6,1
15	150	0,106751	0,100254	0,000042	44,3	46,2	3,5	6,1	4,2
16	180	0,096092	0,091875	0,000018	45,7	47,0	1,7	4,4	2,9
17	210	0,087048	0,084423	0,000007	46,5	47,6	1,3	3,0	2,5
18	240	0,078327	0,077748	0,000000	49,5	48,1	1,8	0,7	2,7
19	270	0,071867	0,071737	0,000000	48,2	48,5	0,1	0,2	0,7
20	330	0,058624	0,061370	0,000008	47,3	49,1	3,2	4,7	3,8
21	390	0,049257	0,052791	0,000012	48,3	49,4	1,3	7,2	2,3
22	450	0,041990	0,045627	0,000013	49,0	49,6	0,4	8,7	1,3
23	510	0,032623	0,039599	0,000049	49,2	49,8	0,3	21,4	1,2
24	570	0,031008	0,034497	0,000012	47,6	49,9	5,1	11,3	4,7
25	630	0,028424	0,030155	0,000003	49,3	49,9	0,4	6,1	1,2
26	690	0,025517	0,026444	0,000001	47,8	49,9	4,6	3,6	4,5
27	750	0,023902	0,023257	0,000000	49,5	50,0	0,2	2,7	0,9
28	810	0,021964	0,020512	0,000002	47,2	50,0	7,7	6,6	5,9
29	870	0,021156	0,018139	0,000009	49,0	50,0	1,0	14,3	2,0
30	930	0,020349	0,016080	0,000018	49,0	50,0	1,0	21,0	2,0
31	990	0,019380	0,014290	0,000026	49,3	50,0	0,5	26,3	1,4
32	1050	0,018249	0,012729	0,000030	48,8	50,0	1,4	30,2	2,5
33	1110	0,017926	0,011364	0,000043	48,4	50,0	2,6	36,6	3,3
34	1170	0,017442	0,010169	0,000053	49,6	50,0	0,2	41,7	0,8
Soma dos erros				0,001006			113,70	9,2	3,5
Variância				0,000030			3,45		
Desvio padrão				0,005522			1,86		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 10x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,17232	0,17232	0,02969	0,02969	0,02969	34	31,5	31,5	992,3	992,3	992,3	34
0,16941	0,16941	0,02870	0,02870	0,02870	Σ(X.Y)	33,5	33,5	1122,3	1122,3	1122,3	Σ(X.Y)
0,16764	0,16379	0,02810	0,02683	0,02746	0,365	33,6	35,1	1129,0	1232,4	1179,5	57898,0
0,16521	0,16521	0,02730	0,02730	0,02730	Σ(X)	34,7	34,7	1204,1	1204,1	1204,1	Σ(X)
0,16295	0,15645	0,02655	0,02448	0,02549	2,986	34,2	37,1	1169,6	1379,0	1270,0	1284,2
0,16021	0,16021	0,02567	0,02567	0,02567	ΣX ²	36,0	36,0	1296,0	1296,0	1296,0	ΣX ²
0,15778	0,14996	0,02490	0,02249	0,02366	0,378	35,7	38,6	1274,5	1493,0	1379,4	56051,3
0,15310	0,14409	0,02344	0,02076	0,02206	(ΣX) ²	37,7	39,8	1421,3	1587,2	1502,0	(ΣX) ²
0,14793	0,13873	0,02188	0,01925	0,02052	8,916	38,4	40,8	1474,6	1667,7	1568,2	1649169,6
0,14260	0,13377	0,02034	0,01789	0,01908	Σ(Y)	40,3	41,7	1624,1	1738,0	1680,1	Σ(Y)
0,13808	0,12915	0,01907	0,01668	0,01783	2,882	38,8	42,4	1505,4	1800,4	1646,3	1328,3
0,13340	0,12483	0,01780	0,01558	0,01665	ΣY ²	39,6	43,1	1568,2	1856,4	1706,2	ΣY ²
0,12985	0,12076	0,01686	0,01458	0,01568	0,354	40,3	43,7	1624,1	1907,0	1759,9	59853,9
0,11757	0,10977	0,01382	0,01205	0,01291	(ΣY) ²	42,5	45,1	1806,3	2033,8	1916,7	(ΣY) ²
0,10675	0,10025	0,01140	0,01005	0,01070	8,303	44,3	46,2	1962,5	2132,1	2045,6	1764416,1
0,09609	0,09188	0,00923	0,00844	0,00883	n.Σ(X.Y)	45,7	47,0	2088,5	2209,3	2148,0	n.Σ(X.Y)
0,08705	0,08442	0,00758	0,00713	0,00735	12,425	46,5	47,6	2162,3	2270,1	2215,5	1968533,7
0,07833	0,07775	0,00614	0,00604	0,00609	n.ΣX ² -(ΣX) ²	49,5	48,1	2450,3	2318,0	2383,2	n.ΣX ² -(ΣX) ²
0,07187	0,07174	0,00516	0,00515	0,00516	3,935	48,2	48,5	2323,2	2356,0	2339,5	256573,9
0,05862	0,06137	0,00344	0,00377	0,00360	n.ΣY ² -(ΣY) ²	47,3	49,1	2237,3	2409,7	2321,9	n.ΣY ² -(ΣY) ²
0,04926	0,05279	0,00243	0,00279	0,00260	3,730	48,3	49,4	2332,9	2443,3	2387,5	270616,1
0,04199	0,04563	0,00176	0,00208	0,00192	r	49,0	49,6	2401,0	2464,4	2432,5	r
0,03262	0,03960	0,00106	0,00157	0,00129	0,997	49,2	49,8	2420,6	2477,7	2449,0	0,997
0,03101	0,03450	0,00096	0,00119	0,00107		47,6	49,9	2265,8	2486,0	2373,3	
0,02842	0,03016	0,00081	0,00091	0,00086		49,3	49,9	2430,5	2491,2	2460,7	
0,02552	0,02644	0,00065	0,00070	0,00067		47,8	49,9	2284,8	2494,5	2387,4	
0,02390	0,02326	0,00057	0,00054	0,00056		49,5	50,0	2450,3	2496,5	2473,3	
0,02196	0,02051	0,00048	0,00042	0,00045		47,2	50,0	2227,8	2497,8	2359,0	
0,02116	0,01814	0,00045	0,00033	0,00038		49,0	50,0	2401,0	2498,6	2449,3	
0,02035	0,01608	0,00041	0,00026	0,00033		49,0	50,0	2401,0	2499,1	2449,6	
0,01938	0,01429	0,00038	0,00020	0,00028		49,3	50,0	2430,5	2499,5	2464,7	
0,01825	0,01273	0,00033	0,00016	0,00023		48,8	50,0	2381,4	2499,7	2439,8	
0,01793	0,01136	0,00032	0,00013	0,00020		48,4	50,0	2342,6	2499,8	2419,9	
0,01744	0,01017	0,00030	0,00010	0,00018		49,6	50,0	2460,2	2499,9	2479,9	

Distribuição T - Student													
D = 10x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}					Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}
0,172319	0,172319	0,000000	34	0,172319	0,161942	0,182696	31,5	31,5	0,0	34	31,5	27,8	35,2
0,169412	0,169412	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,169412	0,159035	0,179789	33,5	33,5	0,0	$\sum(X-Y)^2$	33,5	29,8	37,2
0,167636	0,163786	0,000015	0,001	0,163786	0,157259	0,178013	33,6	35,1	2,3	109,1	33,6	29,9	37,3
0,165213	0,165213	0,000000	GL	0,165213	0,154836	0,175590	34,7	34,7	0,0	GL	34,7	31,0	38,4
0,162952	0,156454	0,000042	33	0,156454	0,152575	0,173329	34,2	37,1	8,6	33	34,2	30,5	37,9
0,160207	0,160207	0,000000	σ^2	0,160207	0,149830	0,170584	36,0	36,0	0,0	σ^2	36,0	32,3	39,7
0,157784	0,149957	0,000061	2,59E-05	0,149957	0,147407	0,168161	35,7	38,6	8,6	3,3	35,7	32,0	39,4
0,153101	0,144093	0,000081	σ	0,144093	0,142724	0,163478	37,7	39,8	4,6	σ	37,7	34,0	41,4
0,147933	0,138728	0,000085	0,01	0,138728	0,137556	0,158310	38,4	40,8	5,9	1,8	38,4	34,7	42,1
0,142603	0,133771	0,000078	Área	0,133771	0,132226	0,152980	40,3	41,7	1,9	Área	40,3	36,6	44,0
0,138081	0,129154	0,000080	0,03	0,129154	0,127704	0,148458	38,8	42,4	13,2	0,03	38,8	35,1	42,5
0,133398	0,124829	0,000073	t($\alpha/2$)	0,124829	0,123021	0,143775	39,6	43,1	12,1	t($\alpha/2$)	39,6	35,9	43,3
0,129845	0,120755	0,000083	2,04	0,120755	0,119468	0,140222	40,3	43,7	11,3	2,04	40,3	36,6	44,0
0,117571	0,109771	0,000061		0,109771	0,107194	0,127948	42,5	45,1	6,7		42,5	38,8	46,2
0,106751	0,100254	0,000042		0,100254	0,096374	0,117128	44,3	46,2	3,5		44,3	40,6	48,0
0,096092	0,091875	0,000018		0,091875	0,085715	0,106469	45,7	47,0	1,7		45,7	42,0	49,4
0,087048	0,084423	0,000007		0,084423	0,076671	0,097425	46,5	47,6	1,3		46,5	42,8	50,2
0,078327	0,077748	0,000000		0,077748	0,067950	0,088704	49,5	48,1	1,8		49,5	45,8	53,2
0,071867	0,071737	0,000000		0,071737	0,061490	0,082244	48,2	48,5	0,1		48,2	44,5	51,9
0,058624	0,061370	0,000008		0,061370	0,048247	0,069001	47,3	49,1	3,2		47,3	43,6	51,0
0,049257	0,052791	0,000012		0,052791	0,038880	0,059634	48,3	49,4	1,3		48,3	44,6	52,0
0,041990	0,045627	0,000013		0,045627	0,031613	0,052367	49,0	49,6	0,4		49,0	45,3	52,7
0,032623	0,039599	0,000049		0,039599	0,022246	0,043000	49,2	49,8	0,3		49,2	45,5	52,9
0,031008	0,034497	0,000012		0,034497	0,020631	0,041385	47,6	49,9	5,1		47,6	43,9	51,3
0,028424	0,030155	0,000003		0,030155	0,018047	0,038801	49,3	49,9	0,4		49,3	45,6	53,0
0,025517	0,026444	0,000001		0,026444	0,015140	0,035894	47,8	49,9	4,6		47,8	44,1	51,5
0,023902	0,023257	0,000000		0,023257	0,013525	0,034279	49,5	50,0	0,2		49,5	45,8	53,2
0,021964	0,020512	0,000002		0,020512	0,011587	0,032341	47,2	50,0	7,7		47,2	43,5	50,9
0,021156	0,018139	0,000009		0,018139	0,010779	0,031533	49,0	50,0	1,0		49,0	45,3	52,7
0,020349	0,016080	0,000018		0,016080	0,009972	0,030726	49,0	50,0	1,0		49,0	45,3	52,7
0,019380	0,014290	0,000026		0,014290	0,009003	0,029757	49,3	50,0	0,5		49,3	45,6	53,0
0,018249	0,012729	0,000030		0,012729	0,007872	0,028626	48,8	50,0	1,4		48,8	45,1	52,5
0,017926	0,011364	0,000043		0,011364	0,007549	0,028303	48,4	50,0	2,6		48,4	44,7	52,1
0,017442	0,010169	0,000053		0,010169	0,007065	0,027819	49,6	50,0	0,2		49,6	45,9	53,3

Tabelas A7 – Temperatura de Secagem 60°C

Resíduo médio quadrático									
D = 17x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M (%)	Erro_T (%)
1	0	0,173163	0,173163	0,000000	32,0	32,0	0,0	0,0	0,0
2	5	0,170288	0,170288	0,000000	34,8	34,8	0,0	0,0	0,0
3	10	0,167572	0,166020	0,000002	33,6	39,2	31,0	0,9	16,6
4	15	0,165335	0,165335	0,000000	33,8	33,8	0,0	0,0	0,0
5	20	0,163419	0,159325	0,000017	35,1	42,6	56,3	2,5	21,4
6	25	0,161022	0,161022	0,000000	35,6	35,6	0,0	0,0	0,0
7	30	0,158786	0,153012	0,000033	36,0	45,0	81,1	3,6	25,0
8	40	0,153035	0,147050	0,000036	38,8	46,9	65,0	3,9	20,8
9	50	0,147444	0,141408	0,000036	39,2	48,4	84,0	4,1	23,4
10	60	0,142013	0,136063	0,000035	42,0	49,6	58,2	4,2	18,2
11	70	0,137220	0,130992	0,000039	42,0	50,7	75,9	4,5	20,7
12	80	0,132109	0,126174	0,000035	42,8	51,7	78,4	4,5	20,7
13	90	0,126198	0,121593	0,000021	43,5	52,5	80,7	3,6	20,6
14	120	0,109105	0,109109	0,000000	47,4	54,5	49,8	0,0	14,9
15	150	0,094569	0,098251	0,000014	51,1	55,9	22,9	3,9	9,4
16	180	0,081150	0,088743	0,000058	53,0	56,9	15,5	9,4	7,4
17	210	0,069808	0,080370	0,000112	55,3	57,7	5,8	15,1	4,3
18	240	0,060863	0,072960	0,000146	55,3	58,3	8,9	19,9	5,4
19	270	0,053035	0,066377	0,000178	54,7	58,7	16,1	25,2	7,3
20	330	0,041054	0,055252	0,000202	56,8	59,3	6,1	34,6	4,4
21	390	0,033387	0,046298	0,000167	53,9	59,6	32,4	38,7	10,6
22	450	0,027796	0,039017	0,000126	56,5	59,8	10,7	40,4	5,8
23	510	0,024121	0,033047	0,000080	55,3	59,9	20,9	37,0	8,3
24	570	0,020767	0,028118	0,000054	55,8	59,9	17,0	35,4	7,4
25	630	0,018850	0,024022	0,000027	57,6	60,0	5,6	27,4	4,1
26	690	0,017252	0,020601	0,000011	57,6	60,0	5,6	19,4	4,1
27	750	0,016294	0,017729	0,000002	57,0	60,0	8,9	8,8	5,2
28	810	0,015176	0,015309	0,000000	57,0	60,0	9,0	0,9	5,2
29	870	0,014377	0,013262	0,000001	57,6	60,0	5,7	7,8	4,2
30	930	0,013578	0,011524	0,000004	55,5	60,0	20,2	15,1	8,1
31	990	0,013578	0,010045	0,000012	57,3	60,0	7,3	26,0	4,7
32	1050	0,012780	0,008781	0,000016	55,3	60,0	22,1	31,3	8,5
Soma dos erros				0,001464			900,77	13,4	9,9
Variância				0,000047			29,06		
Desvio padrão				0,006873			5,39		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 17x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,17316	0,17316	0,02999	0,02999	0,02999	32	32,0	32,0	1024,0	1024,0	1024,0	32
0,17029	0,17029	0,02900	0,02900	0,02900	Σ(X.Y)	34,8	34,8	1211,0	1211,0	1211,0	Σ(X.Y)
0,16757	0,16602	0,02808	0,02756	0,02782	0,353	33,6	39,2	1129,0	1534,0	1316,0	83476,5
0,16534	0,16534	0,02734	0,02734	0,02734	Σ(X)	33,8	33,8	1142,4	1142,4	1142,4	Σ(X)
0,16342	0,15932	0,02671	0,02538	0,02604	2,735	35,1	42,6	1232,0	1814,9	1495,3	1539,2
0,16102	0,16102	0,02593	0,02593	0,02593	ΣX ²	35,6	35,6	1267,4	1267,4	1267,4	ΣX ²
0,15879	0,15301	0,02521	0,02341	0,02430	0,355	36,0	45,0	1296,0	2025,5	1620,2	76739,6
0,15304	0,14705	0,02342	0,02162	0,02250	(ΣX) ²	38,8	46,9	1505,4	2195,8	1818,2	(ΣX) ²
0,14744	0,14141	0,02174	0,02000	0,02085	7,481	39,2	48,4	1536,6	2339,2	1895,9	2369136,6
0,14201	0,13606	0,02017	0,01851	0,01932	Σ(Y)	42,0	49,6	1764,0	2462,9	2084,3	Σ(Y)
0,13722	0,13099	0,01883	0,01716	0,01797	2,790	42,0	50,7	1764,0	2571,5	2129,8	1683,0
0,13211	0,12617	0,01745	0,01592	0,01667	ΣY ²	42,8	51,7	1831,8	2668,0	2210,7	ΣY ²
0,12620	0,12159	0,01593	0,01478	0,01534	0,353	43,5	52,5	1892,3	2754,4	2283,0	91114,3
0,10911	0,10911	0,01190	0,01190	0,01190	(ΣY) ²	47,4	54,5	2246,8	2965,8	2581,3	(ΣY) ²
0,09457	0,09825	0,00894	0,00965	0,00929	7,786	51,1	55,9	2611,2	3123,1	2855,7	2832375,8
0,08115	0,08874	0,00659	0,00788	0,00720	n.Σ(X.Y)	53,0	56,9	2809,0	3241,1	3017,3	n.Σ(X.Y)
0,06981	0,08037	0,00487	0,00646	0,00561	11,304	55,3	57,7	3058,1	3329,9	3191,1	2671249,1
0,06086	0,07296	0,00370	0,00532	0,00444	n.ΣX ² -(ΣX) ²	55,3	58,3	3058,1	3396,7	3222,9	n.ΣX ² -(ΣX) ²
0,05304	0,06638	0,00281	0,00441	0,00352	3,881	54,7	58,7	2992,1	3446,9	3211,5	86529,3
0,04105	0,05525	0,00169	0,00305	0,00227	n.ΣY ² -(ΣY) ²	56,8	59,3	3226,2	3513,2	3366,7	n.ΣY ² -(ΣY) ²
0,03339	0,04630	0,00111	0,00214	0,00155	3,506	53,9	59,6	2905,2	3550,8	3211,8	83281,0
0,02780	0,03902	0,00077	0,00152	0,00108	r	56,5	59,8	3192,3	3572,1	3376,9	r
0,02412	0,03305	0,00058	0,00109	0,00080	0,995	55,3	59,9	3058,1	3584,2	3310,7	0,952
0,02077	0,02812	0,00043	0,00079	0,00058		55,8	59,9	3113,6	3591,1	3343,8	
0,01885	0,02402	0,00036	0,00058	0,00045		57,6	60,0	3317,8	3594,9	3453,6	
0,01725	0,02060	0,00030	0,00042	0,00036		57,6	60,0	3317,8	3597,1	3454,6	
0,01629	0,01773	0,00027	0,00031	0,00029		57,0	60,0	3249,0	3598,4	3419,2	
0,01518	0,01531	0,00023	0,00023	0,00023		57,0	60,0	3249,0	3599,1	3419,6	
0,01438	0,01326	0,00021	0,00018	0,00019		57,6	60,0	3317,8	3599,5	3455,8	
0,01358	0,01152	0,00018	0,00013	0,00016		55,5	60,0	3080,3	3599,7	3329,9	
0,01358	0,01004	0,00018	0,00010	0,00014		57,3	60,0	3283,3	3599,8	3437,9	
0,01278	0,00878	0,00016	0,00008	0,00011		55,3	60,0	3058,1	3599,9	3318,0	

Distribuição T - Student													
D = 17x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{.95%}	Y _{.95%}					Y	Y _{.95%}	Y _{.95%}
0,173163	0,173163	0,000000	32	0,173163	0,159128	0,187198	32,0	32,0	0,0	32	32,0	21,0	43,0
0,170288	0,170288	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,170288	0,156253	0,184323	34,8	34,8	0,0	$\sum(X-Y)^2$	34,8	23,8	45,8
0,167572	0,166020	0,000002	0,001	0,166020	0,153537	0,181607	33,6	39,2	31,0	900,8	33,6	22,6	44,6
0,165335	0,165335	0,000000	GL	0,165335	0,151300	0,179370	33,8	33,8	0,0	GL	33,8	22,8	44,8
0,163419	0,159325	0,000017	31	0,159325	0,149384	0,177454	35,1	42,6	56,3	31	35,1	24,1	46,1
0,161022	0,161022	0,000000	σ^2	0,161022	0,146987	0,175057	35,6	35,6	0,0	σ^2	35,6	24,6	46,6
0,158786	0,153012	0,000033	4,72E-05	0,153012	0,144751	0,172821	36,0	45,0	81,1	29,1	36,0	25,0	47,0
0,153035	0,147050	0,000036	σ	0,147050	0,139000	0,167070	38,8	46,9	65,0	σ	38,8	27,8	49,8
0,147444	0,141408	0,000036	0,01	0,141408	0,133409	0,161479	39,2	48,4	84,0	5,4	39,2	28,2	50,2
0,142013	0,136063	0,000035	Área	0,136063	0,127978	0,156048	42,0	49,6	58,2	Área	42,0	31,0	53,0
0,137220	0,130992	0,000039	0,03	0,130992	0,123185	0,151255	42,0	50,7	75,9	0,03	42,0	31,0	53,0
0,132109	0,126174	0,000035	t($\alpha/2$)	0,126174	0,118074	0,146144	42,8	51,7	78,4	t($\alpha/2$)	42,8	31,8	53,8
0,126198	0,121593	0,000021	2,042	0,121593	0,112163	0,140233	43,5	52,5	80,7	2,04	43,5	32,5	54,5
0,109105	0,109109	0,000000		0,109109	0,095070	0,123140	47,4	54,5	49,8		47,4	36,4	58,4
0,094569	0,098251	0,000014		0,098251	0,080534	0,108604	51,1	55,9	22,9		51,1	40,1	62,1
0,081150	0,088743	0,000058		0,088743	0,067115	0,095185	53,0	56,9	15,5		53,0	42,0	64,0
0,069808	0,080370	0,000112		0,080370	0,055773	0,083843	55,3	57,7	5,8		55,3	44,3	66,3
0,060863	0,072960	0,000146		0,072960	0,046828	0,074898	55,3	58,3	8,9		55,3	44,3	66,3
0,053035	0,066377	0,000178		0,066377	0,039000	0,067070	54,7	58,7	16,1		54,7	43,7	65,7
0,041054	0,055252	0,000202		0,055252	0,027019	0,055089	56,8	59,3	6,1		56,8	45,8	67,8
0,033387	0,046298	0,000167		0,046298	0,019352	0,047422	53,9	59,6	32,4		53,9	42,9	64,9
0,027796	0,039017	0,000126		0,039017	0,013761	0,041831	56,5	59,8	10,7		56,5	45,5	67,5
0,024121	0,033047	0,000080		0,033047	0,010086	0,038156	55,3	59,9	20,9		55,3	44,3	66,3
0,020767	0,028118	0,000054		0,028118	0,006732	0,034802	55,8	59,9	17,0		55,8	44,8	66,8
0,018850	0,024022	0,000027		0,024022	0,004815	0,032885	57,6	60,0	5,6		57,6	46,6	68,6
0,017252	0,020601	0,000011		0,020601	0,003217	0,031287	57,6	60,0	5,6		57,6	46,6	68,6
0,016294	0,017729	0,000002		0,017729	0,002259	0,030329	57,0	60,0	8,9		57,0	46,0	68,0
0,015176	0,015309	0,000000		0,015309	0,001141	0,029211	57,0	60,0	9,0		57,0	46,0	68,0
0,014377	0,013262	0,000001		0,013262	0,000342	0,028412	57,6	60,0	5,7		57,6	46,6	68,6
0,013578	0,011524	0,000004		0,011524	-0,000457	0,027613	55,5	60,0	20,2		55,5	44,5	66,5
0,013578	0,010045	0,000012		0,010045	-0,000457	0,027613	57,3	60,0	7,3		57,3	46,3	68,3
0,012780	0,008781	0,000016		0,008781	-0,001255	0,026815	55,3	60,0	22,1		55,3	44,3	66,3

Tabelas A8 – Temperatura de Secagem 70°C

Resíduo médio quadrático									
D = 20x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M (%)	Erro_T (%)
1	0	0,170186	0,170186	0,000000	29,8	29,8	0,0	0,0	0,0
2	5	0,167626	0,167626	0,000000	35,7	35,7	0,0	0,0	0,0
3	10	0,165547	0,156921	0,000074	36,7	37,4	0,4	5,2	1,8
4	15	0,162828	0,162828	0,000000	38,6	38,6	0,0	0,0	0,0
5	20	0,160909	0,146519	0,000207	37,6	41,6	16,4	8,9	10,8
6	25	0,158189	0,158189	0,000000	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
7	30	0,155310	0,137743	0,000309	40,3	44,9	20,7	11,3	11,3
8	40	0,148752	0,130069	0,000349	43,2	47,4	17,8	12,6	9,8
9	50	0,141395	0,123208	0,000331	45,2	49,6	19,0	12,9	9,6
10	60	0,137556	0,116983	0,000423	47,8	51,4	12,9	15,0	7,5
11	70	0,131958	0,111276	0,000428	48,7	53,0	18,4	15,7	8,8
12	80	0,126040	0,106005	0,000401	49,4	54,4	25,1	15,9	10,1
13	90	0,120122	0,101111	0,000361	50,9	55,7	22,8	15,8	9,4
14	120	0,103167	0,088273	0,000222	56,7	58,8	4,4	14,4	3,7
15	150	0,086852	0,077606	0,000085	58,5	61,2	7,2	10,6	4,6
16	180	0,073736	0,068600	0,000026	60,1	63,0	8,6	7,0	4,9
17	210	0,062540	0,060911	0,000003	62,7	64,5	3,1	2,6	2,8
18	240	0,054063	0,054288	0,000000	62,2	65,6	11,6	0,4	5,5
19	270	0,046065	0,048544	0,000006	62,2	66,5	18,5	5,4	6,9
20	330	0,034549	0,039140	0,000021	63,2	67,8	21,0	13,3	7,2
21	390	0,026871	0,031849	0,000025	64,3	68,6	18,4	18,5	6,7
22	450	0,021273	0,026115	0,000023	64,1	69,1	25,0	22,8	7,8
23	510	0,017754	0,021552	0,000014	64,5	69,4	24,2	21,4	7,6
24	570	0,014875	0,017887	0,000009	66,0	69,6	13,2	20,2	5,5
25	630	0,013276	0,014920	0,000003	64,5	69,8	27,7	12,4	8,2
26	690	0,011996	0,012505	0,000000	67,0	69,9	8,1	4,2	4,3
27	750	0,011036	0,010527	0,000000	64,7	69,9	27,1	4,6	8,0
28	810	0,010237	0,008900	0,000002	65,6	69,9	18,8	13,1	6,6
29	870	0,009437	0,007556	0,000004	59,9	70,0	101,2	19,9	16,8
30	930	0,009437	0,006443	0,000009	63,5	70,0	41,9	31,7	10,2
31	990	0,008797	0,005518	0,000011	60,5	70,0	89,9	37,3	15,7
Soma dos erros				0,003347			623,65	12,0	6,8
Variância				0,000112			20,79		
Desvio padrão				0,010563			4,56		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 20x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,17019	0,17019	0,02896	0,02896	0,02896	31	29,8	29,8	888,0	888,0	888,0	31
0,16763	0,16763	0,02810	0,02810	0,02810	Σ(X.Y)	35,7	35,7	1274,5	1274,5	1274,5	Σ(X.Y)
0,16555	0,15692	0,02741	0,02462	0,02598	0,307	36,7	37,4	1346,9	1395,1	1370,8	101160,3
0,16283	0,16283	0,02651	0,02651	0,02651	Σ(X)	38,6	38,6	1490,0	1490,0	1490,0	Σ(X)
0,16091	0,14652	0,02589	0,02147	0,02358	2,562	37,6	41,6	1413,8	1734,6	1566,0	1674,1
0,15819	0,15819	0,02502	0,02502	0,02502	ΣX ²	40,0	40,0	1600,0	1600,0	1600,0	ΣX ²
0,15531	0,13774	0,02412	0,01897	0,02139	0,331	40,3	44,9	1624,1	2011,7	1807,5	94325,3
0,14875	0,13007	0,02213	0,01692	0,01935	(ΣX) ²	43,2	47,4	1866,2	2248,5	2048,5	(ΣX) ²
0,14140	0,12321	0,01999	0,01518	0,01742	6,566	45,2	49,6	2043,0	2456,1	2240,1	2802610,8
0,13756	0,11698	0,01892	0,01368	0,01609	Σ(Y)	47,8	51,4	2284,8	2641,2	2456,6	Σ(Y)
0,13196	0,11128	0,01741	0,01238	0,01468	2,390	48,7	53,0	2371,7	2808,3	2580,8	1792,9
0,12604	0,10601	0,01589	0,01124	0,01336	ΣY ²	49,4	54,4	2440,4	2960,6	2687,9	ΣY ²
0,12012	0,10111	0,01443	0,01022	0,01215	0,286	50,9	55,7	2590,8	3100,2	2834,1	108618,8
0,10317	0,08827	0,01064	0,00779	0,00911	(ΣY) ²	56,7	58,8	3214,9	3458,0	3334,2	(ΣY) ²
0,08685	0,07761	0,00754	0,00602	0,00674	5,711	58,5	61,2	3422,3	3743,2	3579,1	3214458,6
0,07374	0,06860	0,00544	0,00471	0,00506	n.Σ(X.Y)	60,1	63,0	3612,0	3972,2	3787,8	n.Σ(X.Y)
0,06254	0,06091	0,00391	0,00371	0,00381	9,506	62,7	64,5	3931,3	4156,1	4042,2	3135968,2
0,05406	0,05429	0,00292	0,00295	0,00293	n.ΣX ² -(ΣX) ²	62,2	65,6	3868,8	4303,9	4080,6	n.ΣX ² -(ΣX) ²
0,04607	0,04854	0,00212	0,00236	0,00224	3,697	62,2	66,5	3868,8	4422,6	4136,4	121474,4
0,03455	0,03914	0,00119	0,00153	0,00135	n.ΣY ² -(ΣY) ²	63,2	67,8	3994,2	4593,9	4283,6	n.ΣY ² -(ΣY) ²
0,02687	0,03185	0,00072	0,00101	0,00086	3,140	64,3	68,6	4134,5	4704,0	4410,0	152725,7
0,02127	0,02611	0,00045	0,00068	0,00056	r	64,1	69,1	4108,8	4774,5	4429,2	r
0,01775	0,02155	0,00032	0,00046	0,00038	0,992	64,5	69,4	4160,3	4819,7	4477,9	0,987
0,01488	0,01789	0,00022	0,00032	0,00027		66,0	69,6	4356,0	4848,7	4595,7	
0,01328	0,01492	0,00018	0,00022	0,00020		64,5	69,8	4160,3	4867,2	4499,9	
0,01200	0,01250	0,00014	0,00016	0,00015		67,0	69,9	4489,0	4879,0	4680,0	
0,01104	0,01053	0,00012	0,00011	0,00012		64,7	69,9	4186,1	4886,6	4522,8	
0,01024	0,00890	0,00010	0,00008	0,00009		65,6	69,9	4303,4	4891,4	4588,0	
0,00944	0,00756	0,00009	0,00006	0,00007		59,9	70,0	3588,0	4894,5	4190,7	
0,00944	0,00644	0,00009	0,00004	0,00006		63,5	70,0	4032,3	4896,5	4443,4	
0,00880	0,00552	0,00008	0,00003	0,00005		60,5	70,0	3660,3	4897,8	4234,0	

Distribuição T - Student													
D = 20x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{-95%}	Y _{+95%}					Y	Y _{-95%}	Y _{+95%}
0,170186	0,170186	0,000000	31	0,170186	0,148637	0,191735	29,8	29,8	0,0	31	29,8	20,5	39,1
0,167626	0,167626	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,167626	0,146077	0,189175	35,7	35,7	0,0	$\sum(X-Y)^2$	35,7	26,4	45,0
0,165547	0,156921	0,000074	0,003	0,156921	0,143998	0,187096	36,7	37,4	0,4	623,6	36,7	27,4	46,0
0,162828	0,162828	0,000000	GL	0,162828	0,141279	0,184377	38,6	38,6	0,0	GL	38,6	29,3	47,9
0,160909	0,146519	0,000207	30	0,146519	0,139360	0,182458	37,6	41,6	16,4	30	37,6	28,3	46,9
0,158189	0,158189	0,000000	σ^2	0,158189	0,136640	0,179738	40,0	40,0	0,0	σ^2	40,0	30,7	49,3
0,155310	0,137743	0,000309	0,0001116	0,137743	0,133761	0,176859	40,3	44,9	20,7	20,8	40,3	31,0	49,6
0,148752	0,130069	0,000349	σ	0,130069	0,127203	0,170301	43,2	47,4	17,8	σ	43,2	33,9	52,5
0,141395	0,123208	0,000331	0,01	0,123208	0,119846	0,162944	45,2	49,6	19,0	4,6	45,2	35,9	54,5
0,137556	0,116983	0,000423	Área	0,116983	0,116007	0,159105	47,8	51,4	12,9	Área	47,8	38,5	57,1
0,131958	0,111276	0,000428	0,03	0,111276	0,110409	0,153507	48,7	53,0	18,4	0,03	48,7	39,4	58,0
0,126040	0,106005	0,000401	t($\alpha/2$)	0,106005	0,104491	0,147589	49,4	54,4	25,1	t($\alpha/2$)	49,4	40,1	58,7
0,120122	0,101111	0,000361	2,04	0,101111	0,098573	0,141671	50,9	55,7	22,8	2,04	50,9	41,6	60,2
0,103167	0,088273	0,000222		0,088273	0,081618	0,124716	56,7	58,8	4,4		56,7	47,4	66,0
0,086852	0,077606	0,000085		0,077606	0,065303	0,108401	58,5	61,2	7,2		58,5	49,2	67,8
0,073736	0,068600	0,000026		0,068600	0,052187	0,095285	60,1	63,0	8,6		60,1	50,8	69,4
0,062540	0,060911	0,000003		0,060911	0,040991	0,084089	62,7	64,5	3,1		62,7	53,4	72,0
0,054063	0,054288	0,000000		0,054288	0,032514	0,075612	62,2	65,6	11,6		62,2	52,9	71,5
0,046065	0,048544	0,000006		0,048544	0,024516	0,067614	62,2	66,5	18,5		62,2	52,9	71,5
0,034549	0,039140	0,000021		0,039140	0,013000	0,056098	63,2	67,8	21,0		63,2	53,9	72,5
0,026871	0,031849	0,000025		0,031849	0,005322	0,048420	64,3	68,6	18,4		64,3	55,0	73,6
0,021273	0,026115	0,000023		0,026115	-0,000276	0,042822	64,1	69,1	25,0		64,1	54,8	73,4
0,017754	0,021552	0,000014		0,021552	-0,003795	0,039303	64,5	69,4	24,2		64,5	55,2	73,8
0,014875	0,017887	0,000009		0,017887	-0,006674	0,036424	66,0	69,6	13,2		66,0	56,7	75,3
0,013276	0,014920	0,000003		0,014920	-0,008273	0,034825	64,5	69,8	27,7		64,5	55,2	73,8
0,011996	0,012505	0,000000		0,012505	-0,009553	0,033545	67,0	69,9	8,1		67,0	57,7	76,3
0,011036	0,010527	0,000000		0,010527	-0,010513	0,032585	64,7	69,9	27,1		64,7	55,4	74,0
0,010237	0,008900	0,000002		0,008900	-0,011312	0,031786	65,6	69,9	18,8		65,6	56,3	74,9
0,009437	0,007556	0,000004		0,007556	-0,012112	0,030986	59,9	70,0	101,2		59,9	50,6	69,2
0,009437	0,006443	0,000009		0,006443	-0,012112	0,030986	63,5	70,0	41,9		63,5	54,2	72,8
0,008797	0,005518	0,000011		0,005518	-0,012752	0,030346	60,5	70,0	89,9		60,5	51,2	69,8

Tabelas A9 – Temperatura de Secagem 80°C

Resíduo médio quadrático									
D = 32x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M (%)	Erro_T (%)
1	0	0,172723	0,172723	0,000000	30,5	30,5	0,0	0,0	0,0
2	5	0,168881	0,168881	0,000000	35,3	35,3	0,0	0,0	0,0
3	10	0,166960	0,161679	0,000028	34,6	42,9	68,4	3,2	23,9
4	15	0,164239	0,164239	0,000000	35,3	35,3	0,0	0,0	0,0
5	20	0,161357	0,151843	0,000091	35,2	48,8	185,9	5,9	38,7
6	25	0,159116	0,159116	0,000000	35,3	35,3	0,0	0,0	0,0
7	30	0,156395	0,142944	0,000181	35,3	53,0	314,3	8,6	50,2
8	40	0,149832	0,134839	0,000225	37,2	56,3	363,8	10,0	51,3
9	50	0,141988	0,127415	0,000212	40,0	58,9	357,8	10,3	47,3
10	60	0,135425	0,120583	0,000220	41,1	61,1	401,6	11,0	48,8
11	70	0,127901	0,114271	0,000186	44,4	63,1	347,9	10,7	42,0
12	80	0,120698	0,108420	0,000151	44,7	64,7	400,9	10,2	44,8
13	90	0,114775	0,102980	0,000139	45,0	66,2	449,3	10,3	47,1
14	120	0,093005	0,088735	0,000018	54,7	69,7	225,8	4,6	27,5
15	150	0,075876	0,076990	0,000001	54,3	72,3	323,9	1,5	33,1
16	180	0,061630	0,067170	0,000031	60,8	74,2	179,5	9,0	22,0
17	210	0,050584	0,058873	0,000069	61,7	75,6	193,7	16,4	22,6
18	240	0,041300	0,051803	0,000110	67,8	76,7	78,9	25,4	13,1
19	270	0,032816	0,045735	0,000167	65,5	77,5	143,7	39,4	18,3
20	330	0,024972	0,035951	0,000121	67,0	78,6	133,5	44,0	17,2
21	390	0,018249	0,028526	0,000106	69,8	79,2	87,7	56,3	13,4
22	450	0,014567	0,022811	0,000068	70,1	79,5	88,7	56,6	13,4
23	510	0,012166	0,018362	0,000038	71,0	79,7	76,1	50,9	12,3
24	570	0,009925	0,014869	0,000024	70,8	79,8	81,7	49,8	12,8
25	630	0,009124	0,012106	0,000009	70,4	79,9	90,4	32,7	13,5
26	690	0,008004	0,009909	0,000004	73,1	79,9	46,9	23,8	9,4
27	750	0,007684	0,008152	0,000000	73,1	80,0	47,2	6,1	9,4
28	810	0,007203	0,006742	0,000000	72,0	80,0	63,7	6,4	11,1
29	870	0,006563	0,005607	0,000001	71,6	80,0	70,4	14,6	11,7
30	930	0,006563	0,004689	0,000004	71,6	80,0	70,5	28,6	11,7
Soma dos erros				0,002203			4892,00	18,2	22,2
Variância				0,000076			168,69		
Desvio padrão				0,008716			12,99		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 32x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,17272	0,17272	0,02983	0,02983	0,02983	30	30,5	30,5	930,3	930,2	930,2	30
0,16888	0,16888	0,02852	0,02852	0,02852	Σ(X.Y)	35,3	35,3	1246,1	1246,1	1246,1	Σ(X.Y)
0,16696	0,16168	0,02788	0,02614	0,02699	0,306	34,6	42,9	1197,2	1837,9	1483,3	114772,9
0,16424	0,16424	0,02697	0,02697	0,02697	Σ(X)	35,3	35,3	1246,1	1246,1	1246,1	Σ(X)
0,16136	0,15184	0,02604	0,02306	0,02450	2,421	35,2	48,8	1239,0	2384,9	1719,0	1639,2
0,15912	0,15912	0,02532	0,02532	0,02532	ΣX ²	35,3	35,3	1246,1	1246,1	1246,1	ΣX ²
0,15640	0,14294	0,02446	0,02043	0,02236	0,319	35,3	53,0	1246,1	2811,9	1871,9	96758,7
0,14983	0,13484	0,02245	0,01818	0,02020	(ΣX) ²	37,2	56,3	1383,8	3166,6	2093,4	(ΣX) ²
0,14199	0,12741	0,02016	0,01623	0,01809	5,859	40,0	58,9	1600,0	3471,0	2356,6	2686976,6
0,13543	0,12058	0,01834	0,01454	0,01633	Σ(Y)	41,1	61,1	1689,2	3738,0	2512,8	Σ(Y)
0,12790	0,11427	0,01636	0,01306	0,01462	2,387	44,4	63,1	1971,4	3975,5	2799,5	1974,0
0,12070	0,10842	0,01457	0,01175	0,01309	ΣY ²	44,7	64,7	1998,1	4188,9	2893,1	ΣY ²
0,11478	0,10298	0,01317	0,01060	0,01182	0,295	45,0	66,2	2025,0	4381,9	2978,8	137679,2
0,09301	0,08874	0,00865	0,00787	0,00825	(ΣY) ²	54,7	69,7	2992,1	4861,9	3814,1	(ΣY) ²
0,07588	0,07699	0,00576	0,00593	0,00584	5,698	54,3	72,3	2948,5	5226,8	3925,7	3896791,0
0,06163	0,06717	0,00380	0,00451	0,00414	n.Σ(X.Y)	60,8	74,2	3696,6	5505,4	4511,3	n.Σ(X.Y)
0,05058	0,05887	0,00256	0,00347	0,00298	9,180	61,7	75,6	3806,9	5718,2	4665,7	3443188,1
0,04130	0,05180	0,00171	0,00268	0,00214	n.ΣX ² -(ΣX) ²	67,8	76,7	4596,8	5880,6	5199,3	n.ΣX ² -(ΣX) ²
0,03282	0,04573	0,00108	0,00209	0,00150	3,722	65,5	77,5	4290,3	6004,4	5075,5	215784,4
0,02497	0,03595	0,00062	0,00129	0,00090	n.ΣY ² -(ΣY) ²	67,0	78,6	4489,0	6170,7	5263,1	n.ΣY ² -(ΣY) ²
0,01825	0,02853	0,00033	0,00081	0,00052	3,146	69,8	79,2	4872,0	6267,2	5525,7	233584,2
0,01457	0,02281	0,00021	0,00052	0,00033	r	70,1	79,5	4914,0	6323,1	5574,2	r
0,01217	0,01836	0,00015	0,00034	0,00022	0,994	71,0	79,7	5041,0	6355,5	5660,2	0,924
0,00993	0,01487	0,00010	0,00022	0,00015		70,8	79,8	5012,6	6374,2	5652,6	
0,00912	0,01211	0,00008	0,00015	0,00011		70,4	79,9	4956,2	6385,1	5625,4	
0,00800	0,00991	0,00006	0,00010	0,00008		73,1	79,9	5343,6	6391,4	5844,1	
0,00768	0,00815	0,00006	0,00007	0,00006		73,1	80,0	5343,6	6395,0	5845,7	
0,00720	0,00674	0,00005	0,00005	0,00005		72,0	80,0	5184,0	6397,1	5758,7	
0,00656	0,00561	0,00004	0,00003	0,00004		71,6	80,0	5126,6	6398,3	5727,3	
0,00656	0,00469	0,00004	0,00002	0,00003		71,6	80,0	5126,6	6399,0	5727,6	

Distribuição T - Student													
D = 32x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{-95%}	Y _{+95%}					Y	Y _{-95%}	Y _{+95%}
0,172723	0,172723	0,000000	30	0,172723	0,154943	0,190503	30,5	30,5	0,0	30	30,5	4,0	57,0
0,168881	0,168881	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,168881	0,151101	0,186661	35,3	35,3	0,0	$\sum(X-Y)^2$	35,3	8,8	61,8
0,166960	0,161679	0,000028	0,002	0,161679	0,149180	0,184740	34,6	42,9	68,4	4892,0	34,6	8,1	61,1
0,164239	0,164239	0,000000	GL	0,164239	0,146459	0,182019	35,3	35,3	0,0	GL	35,3	8,8	61,8
0,161357	0,151843	0,000091	29	0,151843	0,143577	0,179137	35,2	48,8	185,9	29	35,2	8,7	61,7
0,159116	0,159116	0,000000	σ^2	0,159116	0,141336	0,176896	35,3	35,3	0,0	σ^2	35,3	8,8	61,8
0,156395	0,142944	0,000181	7,59614E-05	0,142944	0,138615	0,174175	35,3	53,0	314,3	168,7	35,3	8,8	61,8
0,149832	0,134839	0,000225	σ	0,134839	0,132052	0,167612	37,2	56,3	363,8	σ	37,2	10,7	63,7
0,141988	0,127415	0,000212	0,01	0,127415	0,124208	0,159768	40,0	58,9	357,8	13,0	40,0	13,5	66,5
0,135425	0,120583	0,000220	Área	0,120583	0,117645	0,153205	41,1	61,1	401,6	Área	41,1	14,6	67,6
0,127901	0,114271	0,000186	0,03	0,114271	0,110121	0,145681	44,4	63,1	347,9	0,03	44,4	17,9	70,9
0,120698	0,108420	0,000151	t($\alpha/2$)	0,108420	0,102918	0,138478	44,7	64,7	400,9	t($\alpha/2$)	44,7	18,2	71,2
0,114775	0,102980	0,000139	2,04	0,102980	0,096995	0,132555	45,0	66,2	449,3	2,04	45,0	18,5	71,5
0,093005	0,088735	0,000018		0,088735	0,075225	0,110785	54,7	69,7	225,8		54,7	28,2	81,2
0,075876	0,076990	0,000001		0,076990	0,058096	0,093656	54,3	72,3	323,9		54,3	27,8	80,8
0,061630	0,067170	0,000031		0,067170	0,043850	0,079410	60,8	74,2	179,5		60,8	34,3	87,3
0,050584	0,058873	0,000069		0,058873	0,032804	0,068364	61,7	75,6	193,7		61,7	35,2	88,2
0,041300	0,051803	0,000110		0,051803	0,023520	0,059080	67,8	76,7	78,9		67,8	41,3	94,3
0,032816	0,045735	0,000167		0,045735	0,015036	0,050596	65,5	77,5	143,7		65,5	39,0	92,0
0,024972	0,035951	0,000121		0,035951	0,007192	0,042752	67,0	78,6	133,5		67,0	40,5	93,5
0,018249	0,028526	0,000106		0,028526	0,000469	0,036029	69,8	79,2	87,7		69,8	43,3	96,3
0,014567	0,022811	0,000068		0,022811	-0,003213	0,032347	70,1	79,5	88,7		70,1	43,6	96,6
0,012166	0,018362	0,000038		0,018362	-0,005614	0,029946	71,0	79,7	76,1		71,0	44,5	97,5
0,009925	0,014869	0,000024		0,014869	-0,007855	0,027705	70,8	79,8	81,7		70,8	44,3	97,3
0,009124	0,012106	0,000009		0,012106	-0,008656	0,026904	70,4	79,9	90,4		70,4	43,9	96,9
0,008004	0,009909	0,000004		0,009909	-0,009776	0,025784	73,1	79,9	46,9		73,1	46,6	99,6
0,007684	0,008152	0,000000		0,008152	-0,010096	0,025464	73,1	80,0	47,2		73,1	46,6	99,6
0,007203	0,006742	0,000000		0,006742	-0,010577	0,024983	72,0	80,0	63,7		72,0	45,5	98,5
0,006563	0,005607	0,000001		0,005607	-0,011217	0,024343	71,6	80,0	70,4		71,6	45,1	98,1
0,006563	0,004689	0,000004		0,004689	-0,011217	0,024343	71,6	80,0	70,5		71,6	45,1	98,1

Tabelas A10 – Temperatura de Secagem 90°C

Resíduo médio quadrático									
D = 46x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]									
N	t [min]	M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M(%)	Erro_T(%)
1	0	0,167900	0,167900	0,000000	27,6	27,6	0,0	0,0	0,0
2	5	0,164522	0,164522	0,000000	32,3	32,3	0,0	0,0	0,0
3	10	0,162432	0,154500	0,000063	33,1	43,1	99,1	4,9	30,1
4	15	0,160180	0,160180	0,000000	33,8	33,8	0,0	0,0	0,0
5	20	0,157446	0,143011	0,000208	34,6	50,5	253,0	9,2	46,0
6	25	0,155516	0,155516	0,000000	33,7	33,7	0,0	0,0	0,0
7	30	0,153104	0,132921	0,000407	35,4	55,8	414,2	13,2	57,5
8	40	0,146671	0,123947	0,000516	39,2	59,8	425,2	15,5	52,6
9	50	0,139916	0,115889	0,000577	40,7	63,1	503,5	17,2	55,1
10	60	0,131071	0,108596	0,000505	40,5	65,9	646,9	17,1	62,8
11	70	0,124960	0,101958	0,000529	44,6	68,3	563,7	18,4	53,2
12	80	0,118688	0,095885	0,000520	44,6	70,4	668,1	19,2	58,0
13	90	0,113059	0,090306	0,000518	43,2	72,3	847,3	20,1	67,4
14	120	0,091348	0,075996	0,000236	49,4	76,8	749,5	16,8	55,4
15	150	0,073175	0,064521	0,000075	61,7	80,0	336,3	11,8	29,7
16	180	0,059022	0,055157	0,000015	65,5	82,5	287,8	6,5	25,9
17	210	0,047925	0,047416	0,000000	67,4	84,3	285,1	1,1	25,0
18	240	0,039080	0,040951	0,000003	70,2	85,7	238,8	4,8	22,0
19	270	0,032326	0,035505	0,000010	72,1	86,7	212,9	9,8	20,2
20	330	0,021872	0,026949	0,000026	77,0	88,1	122,7	23,2	14,4
21	390	0,015761	0,020671	0,000024	79,8	88,9	82,4	31,2	11,4
22	450	0,012062	0,015994	0,000015	79,0	89,3	107,0	32,6	13,1
23	510	0,009649	0,012470	0,000008	78,7	89,6	119,2	29,2	13,9
24	570	0,007880	0,009792	0,000004	81,2	89,8	73,6	24,3	10,6
25	630	0,006915	0,007744	0,000001	78,6	89,9	127,0	12,0	14,3
26	690	0,005950	0,006169	0,000000	81,5	89,9	71,0	3,7	10,3
27	750	0,005950	0,004953	0,000001	80,6	90,0	87,5	16,8	11,6
28	810	0,005146	0,004010	0,000001	81,2	90,0	77,0	22,1	10,8
29	870	0,004825	0,003278	0,000002	80,6	90,0	88,1	32,1	11,6
30	930	0,004664	0,002707	0,000004	78,1	90,0	141,4	42,0	15,2
Soma dos erros				0,004270			7628,33	15,2	26,6
Variância				0,000147			263,05		
Desvio padrão				0,012134			16,22		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 46x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,16790	0,16790	0,02819	0,02819	0,02819	30	27,6	27,6	761,8	761,8	761,8	30
0,16452	0,16452	0,02707	0,02707	0,02707	∑(X.Y)	32,3	32,3	1043,3	1043,3	1043,3	∑(X.Y)
0,16243	0,15450	0,02638	0,02387	0,02510	0,277	33,1	43,1	1095,6	1853,7	1425,1	136710,7
0,16018	0,16018	0,02566	0,02566	0,02566	∑(X)	33,8	33,8	1142,4	1142,4	1142,4	∑(X)
0,15745	0,14301	0,02479	0,02045	0,02252	2,339	34,6	50,5	1197,2	2550,8	1747,5	1745,9
0,15552	0,15552	0,02419	0,02419	0,02419	∑X ²	33,7	33,7	1135,7	1135,7	1135,7	∑X ²
0,15310	0,13292	0,02344	0,01767	0,02035	0,304	35,4	55,8	1253,2	3108,3	1973,6	113344,9
0,14667	0,12395	0,02151	0,01536	0,01818	(∑X) ²	39,2	59,8	1536,6	3578,4	2344,9	(∑X) ²
0,13992	0,11589	0,01958	0,01343	0,01621	5,471	40,7	63,1	1656,5	3986,4	2569,7	3048166,8
0,13107	0,10860	0,01718	0,01179	0,01423	∑(Y)	40,5	65,9	1640,3	4347,4	2670,4	∑(Y)
0,12496	0,10196	0,01562	0,01040	0,01274	2,149	44,6	68,3	1989,2	4670,8	3048,1	2158,0
0,11869	0,09588	0,01409	0,00919	0,01138	∑Y ²	44,6	70,4	1989,2	4962,9	3142,0	∑Y ²
0,11306	0,09031	0,01278	0,00816	0,01021	0,255	43,2	72,3	1866,2	5228,4	3123,7	167704,8
0,09135	0,07600	0,00834	0,00578	0,00694	(∑Y) ²	49,4	76,8	2440,4	5894,6	3792,7	(∑Y) ²
0,07318	0,06452	0,00535	0,00416	0,00472	4,620	61,7	80,0	3806,9	6406,4	4938,5	4657015,4
0,05902	0,05516	0,00348	0,00304	0,00326	n.∑(X.Y)	65,5	82,5	4290,3	6800,5	5401,5	n.∑(X.Y)
0,04793	0,04742	0,00230	0,00225	0,00227	8,323	67,4	84,3	4542,8	7103,7	5680,7	4101320,0
0,03908	0,04095	0,00153	0,00168	0,00160	n.∑X ² -(∑X) ²	70,2	85,7	4928,0	7336,7	6013,0	n.∑X ² -(∑X) ²
0,03233	0,03550	0,00104	0,00126	0,00115	3,641	72,1	86,7	5198,4	7515,5	6250,5	352180,5
0,02187	0,02695	0,00048	0,00073	0,00059	n.∑Y ² -(∑Y) ²	77,0	88,1	5929,0	7757,6	6781,9	n.∑Y ² -(∑Y) ²
0,01576	0,02067	0,00025	0,00043	0,00033	3,042	79,8	88,9	6368,0	7899,5	7092,6	374127,2
0,01206	0,01599	0,00015	0,00026	0,00019	r	79,0	89,3	6241,0	7982,7	7058,3	r
0,00965	0,01247	0,00009	0,00016	0,00012	0,990	78,7	89,6	6193,7	8031,4	7052,9	0,919
0,00788	0,00979	0,00006	0,00010	0,00008		81,2	89,8	6593,4	8059,9	7289,9	
0,00692	0,00774	0,00005	0,00006	0,00005		78,6	89,9	6178,0	8076,6	7063,8	
0,00595	0,00617	0,00004	0,00004	0,00004		81,5	89,9	6642,3	8086,3	7328,8	
0,00595	0,00495	0,00004	0,00002	0,00003		80,6	90,0	6496,4	8092,0	7250,4	
0,00515	0,00401	0,00003	0,00002	0,00002		81,2	90,0	6593,4	8095,3	7305,9	
0,00483	0,00328	0,00002	0,00001	0,00002		80,6	90,0	6496,4	8097,3	7252,8	
0,00466	0,00271	0,00002	0,00001	0,00001		78,1	90,0	6099,6	8098,4	7028,3	

Distribuição T - Student													
D = 46x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}					Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}
0,167900	0,167900	0,000000	30	0,167900	0,143147	0,192653	27,6	27,6	0,0	30	27,6	-5,5	60,7
0,164522	0,164522	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,164522	0,139769	0,189275	32,3	32,3	0,0	$\sum(X-Y)^2$	32,3	-0,8	65,4
0,162432	0,154500	0,000063	0,004	0,154500	0,137679	0,187185	33,1	43,1	99,1	7628,3	33,1	0,0	66,2
0,160180	0,160180	0,000000	GL	0,160180	0,135427	0,184933	33,8	33,8	0,0	GL	33,8	0,7	66,9
0,157446	0,143011	0,000208	29	0,143011	0,132693	0,182199	34,6	50,5	253,0	29	34,6	1,5	67,7
0,155516	0,155516	0,000000	σ^2	0,155516	0,130763	0,180269	33,7	33,7	0,0	σ^2	33,7	0,6	66,8
0,153104	0,132921	0,000407	0,0001472	0,132921	0,128351	0,177857	35,4	55,8	414,2	263,0	35,4	2,3	68,5
0,146671	0,123947	0,000516	σ	0,123947	0,121918	0,171424	39,2	59,8	425,2	σ	39,2	6,1	72,3
0,139916	0,115889	0,000577	0,01	0,115889	0,115163	0,164669	40,7	63,1	503,5	16,2	40,7	7,6	73,8
0,131071	0,108596	0,000505	Área	0,108596	0,106318	0,155824	40,5	65,9	646,9	Área	40,5	7,4	73,6
0,124960	0,101958	0,000529	0,03	0,101958	0,100207	0,149713	44,6	68,3	563,7	0,03	44,6	11,5	77,7
0,118688	0,095885	0,000520	t($\alpha/2$)	0,095885	0,093935	0,143441	44,6	70,4	668,1	t($\alpha/2$)	44,6	11,5	77,7
0,113059	0,090306	0,000518	2,04	0,090306	0,088306	0,137812	43,2	72,3	847,3	2,04	43,2	10,1	76,3
0,091348	0,075996	0,000236		0,075996	0,066595	0,116101	49,4	76,8	749,5		49,4	16,3	82,5
0,073175	0,064521	0,000075		0,064521	0,048422	0,097928	61,7	80,0	336,3		61,7	28,6	94,8
0,059022	0,055157	0,000015		0,055157	0,034269	0,083775	65,5	82,5	287,8		65,5	32,4	98,6
0,047925	0,047416	0,000000		0,047416	0,023172	0,072678	67,4	84,3	285,1		67,4	34,3	100,5
0,039080	0,040951	0,000003		0,040951	0,014327	0,063833	70,2	85,7	238,8		70,2	37,1	103,3
0,032326	0,035505	0,000010		0,035505	0,007573	0,057079	72,1	86,7	212,9		72,1	39,0	105,2
0,021872	0,026949	0,000026		0,026949	-0,002881	0,046625	77,0	88,1	122,7		77,0	43,9	110,1
0,015761	0,020671	0,000024		0,020671	-0,008992	0,040514	79,8	88,9	82,4		79,8	46,7	112,9
0,012062	0,015994	0,000015		0,015994	-0,012691	0,036815	79,0	89,3	107,0		79,0	45,9	112,1
0,009649	0,012470	0,000008		0,012470	-0,015104	0,034402	78,7	89,6	119,2		78,7	45,6	111,8
0,007880	0,009792	0,000004		0,009792	-0,016873	0,032633	81,2	89,8	73,6		81,2	48,1	114,3
0,006915	0,007744	0,000001		0,007744	-0,017838	0,031668	78,6	89,9	127,0		78,6	45,5	111,7
0,005950	0,006169	0,000000		0,006169	-0,018803	0,030703	81,5	89,9	71,0		81,5	48,4	114,6
0,005950	0,004953	0,000001		0,004953	-0,018803	0,030703	80,6	90,0	87,5		80,6	47,5	113,7
0,005146	0,004010	0,000001		0,004010	-0,019607	0,029899	81,2	90,0	77,0		81,2	48,1	114,3
0,004825	0,003278	0,000002		0,003278	-0,019928	0,029578	80,6	90,0	88,1		80,6	47,5	113,7
0,004664	0,002707	0,000004		0,002707	-0,020089	0,029417	78,1	90,0	141,4		78,1	45,0	111,2

Tabelas A11 – Temperatura de Secagem 100°C

Resíduo médio quadrático									
D = 85x10⁻¹⁰ [m²/s]									
N	t [min]	M_(Exp) [kg/kg,b.s]	M_(Num) [kg/kg,b.s]	ERMQ	T_(Exp) [°C]	T_(Num) [°C]	ERMQ	Erro_M (%)	Erro_T (%)
1	0	0,169366	0,169366	0,000000	27,5	27,5	0,0	0,0	0,0
2	5	0,165838	0,165838	0,000000	35,5	35,5	0,0	0,0	0,0
3	10	0,163913	0,150730	0,000174	35,8	45,2	88,4	8,0	26,3
4	15	0,161187	0,161187	0,000000	37,5	37,5	0,0	0,0	0,0
5	20	0,157979	0,135995	0,000483	38,5	53,8	234,0	13,9	39,7
6	25	0,154611	0,154611	0,000000	39,2	39,2	0,0	0,0	0,0
7	30	0,151243	0,123696	0,000759	40,0	59,9	394,3	18,2	49,6
8	40	0,141941	0,113143	0,000829	42,6	64,6	482,5	20,3	51,6
9	50	0,133119	0,103928	0,000852	43,7	68,4	610,7	21,9	56,6
10	60	0,124940	0,095785	0,000850	45,9	71,7	663,5	23,3	56,1
11	70	0,115156	0,088527	0,000709	47,4	74,5	732,2	23,1	57,1
12	80	0,108260	0,082012	0,000689	49,0	76,9	778,9	24,2	57,0
13	90	0,096391	0,076132	0,000410	49,7	79,1	862,9	21,0	59,1
14	120	0,074579	0,061518	0,000171	58,3	84,3	675,7	17,5	44,6
15	150	0,057257	0,050295	0,000048	62,3	88,1	666,6	12,2	41,4
16	180	0,043304	0,041483	0,000003	71,8	91,0	367,6	4,2	26,7
17	210	0,032237	0,034450	0,000005	83,0	93,1	102,5	6,9	12,2
18	240	0,025020	0,028766	0,000014	76,5	94,7	333,0	15,0	23,9
19	270	0,020048	0,024129	0,000017	74,2	96,0	474,6	20,4	29,4
20	330	0,012510	0,017164	0,000022	87,1	97,6	111,2	37,2	12,1
21	390	0,008180	0,012359	0,000017	92,7	98,6	35,0	51,1	6,4
22	450	0,006095	0,008994	0,000008	93,0	99,2	38,2	47,6	6,6
23	510	0,004330	0,006614	0,000005	91,6	99,5	62,7	52,8	8,6
24	570	0,003528	0,004920	0,000002	93,8	99,7	35,0	39,5	6,3
25	630	0,003208	0,003707	0,000000	94,3	99,8	30,6	15,6	5,9
26	690	0,002566	0,002836	0,000000	94,6	99,9	28,1	10,5	5,6
27	750	0,002245	0,002208	0,000000	95,2	99,9	22,5	1,7	5,0
Soma dos erros				0,006069			7830,63	18,7	25,5
Variância				0,000233			301,18		
Desvio padrão				0,015278			17,35		

Coeficiente de Correlação de Pearson											
D = 85x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]											
M _(Exp) [kg/kg.b.s]	M _(Num) [kg/kg.b.s]	X ²	Y ²	XY	n	T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	X ²	Y ²	XY	n
0,16937	0,16937	0,02868	0,02869	0,02868	27	27,5	27,5	756,3	756,2	756,2	27
0,16584	0,16584	0,02750	0,02750	0,02750	Σ(X.Y)	35,5	35,5	1260,3	1260,3	1260,3	Σ(X.Y)
0,16391	0,15073	0,02687	0,02272	0,02471	0,251	35,8	45,2	1281,6	2043,3	1618,3	144054,9
0,16119	0,16119	0,02598	0,02598	0,02598	Σ(X)	37,5	37,5	1406,3	1406,3	1406,3	Σ(X)
0,15798	0,13599	0,02496	0,01849	0,02148	2,139	38,5	53,8	1482,3	2894,0	2071,1	1700,7
0,15461	0,15461	0,02390	0,02390	0,02390	ΣX ²	39,2	39,2	1536,6	1536,6	1536,6	ΣX ²
0,15124	0,12370	0,02287	0,01530	0,01871	0,282	40,0	59,9	1600,0	3582,9	2394,3	121877,1
0,14194	0,11314	0,02015	0,01280	0,01606	(ΣX) ²	42,6	64,6	1814,8	4168,7	2750,5	(ΣX) ²
0,13312	0,10393	0,01772	0,01080	0,01383	4,576	43,7	68,4	1909,7	4680,3	2989,6	2892380,5
0,12494	0,09579	0,01561	0,00917	0,01197	Σ(Y)	45,9	71,7	2106,8	5135,0	3289,2	Σ(Y)
0,11516	0,08853	0,01326	0,00784	0,01019	1,920	47,4	74,5	2246,8	5544,0	3529,3	2075,2
0,10826	0,08201	0,01172	0,00673	0,00888	ΣY ²	49,0	76,9	2401,0	5914,9	3768,5	ΣY ²
0,09639	0,07613	0,00929	0,00580	0,00734	0,227	49,7	79,1	2470,1	6252,9	3930,0	174063,3
0,07458	0,06152	0,00556	0,00378	0,00459	(ΣY) ²	58,3	84,3	3398,9	7105,4	4914,3	(ΣY) ²
0,05726	0,05030	0,00328	0,00253	0,00288	3,688	62,3	88,1	3881,3	7765,1	5489,8	4306581,9
0,04330	0,04148	0,00188	0,00172	0,00180	n.Σ(X.Y)	71,8	91,0	5155,2	8276,1	6531,9	n.Σ(X.Y)
0,03224	0,03445	0,00104	0,00119	0,00111	6,784	83,0	93,1	6889,0	8671,7	7729,1	3889481,3
0,02502	0,02877	0,00063	0,00083	0,00072	n.ΣX ² -(ΣX) ²	76,5	94,7	5852,3	8977,2	7248,2	n.ΣX ² -(ΣX) ²
0,02005	0,02413	0,00040	0,00058	0,00048	3,028	74,2	96,0	5505,6	9213,0	7122,0	398300,9
0,01251	0,01716	0,00016	0,00029	0,00021	n.ΣY ² -(ΣY) ²	87,1	97,6	7586,4	9534,4	8504,8	n.ΣY ² -(ΣY) ²
0,00818	0,01236	0,00007	0,00015	0,00010	2,441	92,7	98,6	8593,3	9724,8	9141,6	393126,3
0,00610	0,00899	0,00004	0,00008	0,00005	r	93,0	99,2	8649,0	9837,4	9224,1	r
0,00433	0,00661	0,00002	0,00004	0,00003	0,984	91,6	99,5	8390,6	9904,0	9115,9	0,910
0,00353	0,00492	0,00001	0,00002	0,00002		93,8	99,7	8798,4	9943,3	9353,4	
0,00321	0,00371	0,00001	0,00001	0,00001		94,3	99,8	8892,5	9966,6	9414,2	
0,00257	0,00284	0,00001	0,00001	0,00001		94,6	99,9	8949,2	9980,3	9450,7	
0,00225	0,00221	0,00001	0,00000	0,00000		95,2	99,9	9063,0	9988,4	9514,5	

Distribuição T - Student													
D = 85x10 ⁻¹⁰ [m ² /s]													
M _(Exp) [kg/kg,b.s]	M _(Num) [kg/kg,b.s]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%			T _(Exp) [°C]	T _(Num) [°C]	(X-Y) ²	n	Nível de Confiança 95%		
				Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}					Y	Y _{.95%}	Y _{+95%}
0,169366	0,169366	0,000000	27	0,169366	0,138199	0,200533	27,5	27,5	0,0	27	27,5	-7,9	62,9
0,165838	0,165838	0,000000	$\sum(X-Y)^2$	0,165838	0,134671	0,197005	35,5	35,5	0,0	$\sum(X-Y)^2$	35,5	0,1	70,9
0,163913	0,150730	0,000174	0,006	0,150730	0,132746	0,195080	35,8	45,2	88,4	7830,6	35,8	0,4	71,2
0,161187	0,161187	0,000000	GL	0,161187	0,130020	0,192354	37,5	37,5	0,0	GL	37,5	2,1	72,9
0,157979	0,135995	0,000483	26	0,135995	0,126812	0,189146	38,5	53,8	234,0	26	38,5	3,1	73,9
0,154611	0,154611	0,000000	σ^2	0,154611	0,123444	0,185778	39,2	39,2	0,0	σ^2	39,2	3,8	74,6
0,151243	0,123696	0,000759	0,0002334	0,123696	0,120076	0,182410	40,0	59,9	394,3	301,2	40,0	4,6	75,4
0,141941	0,113143	0,000829	σ	0,113143	0,110774	0,173108	42,6	64,6	482,5	σ	42,6	7,2	78,0
0,133119	0,103928	0,000852	0,02	0,103928	0,101952	0,164286	43,7	68,4	610,7	17,4	43,7	8,3	79,1
0,124940	0,095785	0,000850	Área	0,095785	0,093773	0,156107	45,9	71,7	663,5	Área	45,9	10,5	81,3
0,115156	0,088527	0,000709	0,03	0,088527	0,083989	0,146323	47,4	74,5	732,2	0,03	47,4	12,0	82,8
0,108260	0,082012	0,000689	t($\alpha/2$)	0,082012	0,077093	0,139427	49,0	76,9	778,9	t($\alpha/2$)	49,0	13,6	84,4
0,096391	0,076132	0,000410	2,04	0,076132	0,065224	0,127558	49,7	79,1	862,9	2,04	49,7	14,3	85,1
0,074579	0,061518	0,000171		0,061518	0,043412	0,105746	58,3	84,3	675,7		58,3	22,9	93,7
0,057257	0,050295	0,000048		0,050295	0,026090	0,088424	62,3	88,1	666,6		62,3	26,9	97,7
0,043304	0,041483	0,000003		0,041483	0,012137	0,074471	71,8	91,0	367,6		71,8	36,4	107,2
0,032237	0,034450	0,000005		0,034450	0,001070	0,063404	83,0	93,1	102,5		83,0	47,6	118,4
0,025020	0,028766	0,000014		0,028766	-0,006147	0,056187	76,5	94,7	333,0		76,5	41,1	111,9
0,020048	0,024129	0,000017		0,024129	-0,011119	0,051215	74,2	96,0	474,6		74,2	38,8	109,6
0,012510	0,017164	0,000022		0,017164	-0,018657	0,043677	87,1	97,6	111,2		87,1	51,7	122,5
0,008180	0,012359	0,000017		0,012359	-0,022987	0,039347	92,7	98,6	35,0		92,7	57,3	128,1
0,006095	0,008994	0,000008		0,008994	-0,025072	0,037262	93,0	99,2	38,2		93,0	57,6	128,4
0,004330	0,006614	0,000005		0,006614	-0,026837	0,035497	91,6	99,5	62,7		91,6	56,2	127,0
0,003528	0,004920	0,000002		0,004920	-0,027639	0,034695	93,8	99,7	35,0		93,8	58,4	129,2
0,003208	0,003707	0,000000		0,003707	-0,027959	0,034375	94,3	99,8	30,6		94,3	58,9	129,7
0,002566	0,002836	0,000000		0,002836	-0,028601	0,033733	94,6	99,9	28,1		94,6	59,2	130,0
0,002245	0,002208	0,000000		0,002208	-0,028922	0,033412	95,2	99,9	22,5		95,2	59,8	130,6

T [°C]	ϕ [%]	ϕ	P_v^{Sat} [bar]	P_v [bar]	$P_{ambiente}$ [bar]	ω	V_{ar} [m/s]	$A_{ent. estufa}$ [m ²]	W_{ar} [m ³ /s]	$\rho_{ar seco}$ [kg/m ³]	$\dot{m}_{ar seco}$ [kg/s]	$\dot{m}_{ar seco}$ [g/s]	$\dot{m}_{vapor d'água}$ [g/s]
50	18,4	0,184	0,1235	0,0227	1,01325	0,0143	1	0,25	0,250	1,092	0,2731	273,09	3,8969
60	12,3	0,123	0,1994	0,0245	1,01325	0,0154	1	0,25	0,250	1,060	0,2649	264,89	4,0871
70	7,7	0,077	0,3119	0,0240	1,01325	0,0151	1	0,25	0,250	1,029	0,2572	257,17	3,8835
80	5	0,050	0,4739	0,0237	1,01325	0,0149	1	0,25	0,250	1,000	0,2499	249,89	3,7219
90	3,6	0,036	0,7014	0,0253	1,01325	0,0159	1	0,25	0,250	0,972	0,2430	243,01	3,8630
100	2,3	0,023	1,0140	0,0233	1,01325	0,0147	1	0,25	0,250	0,946	0,2365	236,50	3,4656

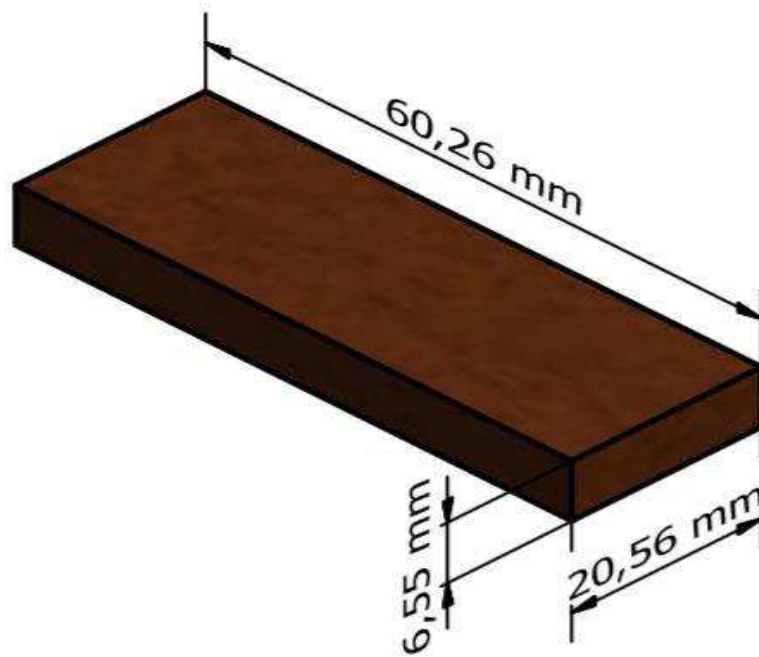
Condição de Contorno	Dados simulação numérica					
	50	60	70	80	90	100
Temperatura ar [°C]	50	60	70	80	90	100
Vazão ar [g s ⁻¹]	273,09	264,89	257,17	249,89	243,01	236,5
Coef. difusão umidade ar [m ² s ⁻¹]	0,000027280	0,000028948	0,000030662	0,000032419	0,000034218	0,000036058
Temperatura inicial do tijolo [°C]	31,5	32,0	29,8	30,5	27,6	27,5
Massa água inicial tijolo [g]	1067	1084	1064	1079	1044	1056
Massa água inicial estufa [g]	2,32	2,44	2,31	2,22	2,30	2,07
Vazão vapor [g s ⁻¹]	3,897	4,087	3,884	3,722	3,863	3,466
Tempo total [min]	1170	1050	990	930	930	750

R [J/ (mol. K)]	8,314	MM [g/mol]	28,9645	R _{part} [J/g. K]	0,287041033	MM [g/mol]	18,02
-----------------	-------	------------	---------	----------------------------	-------------	------------	-------

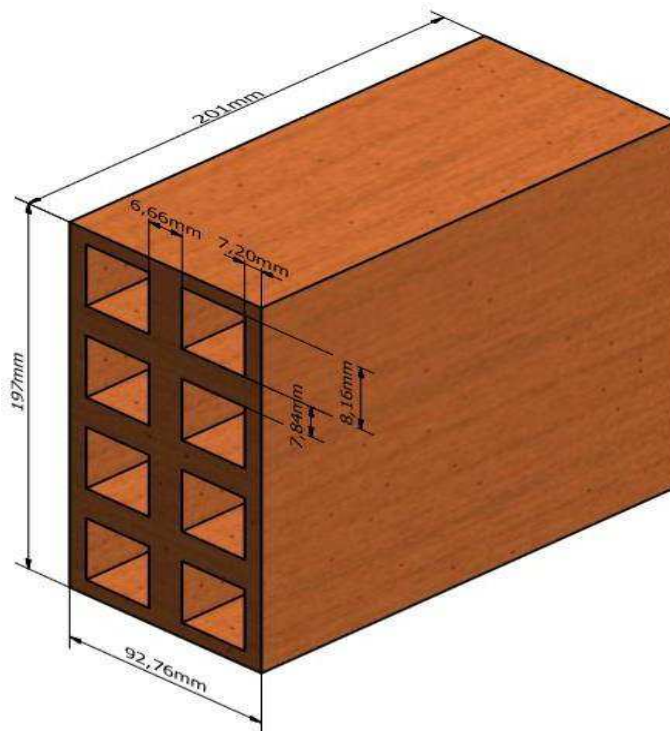
Tabelas A12 – Cálculos Psicrométricos

APÊNDICE C – Tijolos dimensionados

- Tijolo maciço



- Tijolo 8 furos



- Tijolo estrutural

