



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS



SIMULAÇÃO NUMÉRICA VIA CFD DA SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS INDUSTRIAIS

Autora: Morgana de Vasconcellos Araújo

Orientadores: Professor Doutor Antonio Gilson Barbosa de Lima

Professor Doutor Severino Rodrigues de Farias Neto

Campina Grande-PB, Outubro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

SIMULAÇÃO NUMÉRICA VIA CFD DA SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS
INDUSTRIAIS

Tese de doutorado submetida à coordenação do curso de doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande.

Autora: Morgana de Vasconcellos Araújo

Orientadores: Professor Doutor Antonio Gilson Barbosa de Lima

Professor Doutor Severino Rodrigues de Farias Neto

Campina Grande-PB, 24 de Outubro de 2019

A663s

Araújo, Morgana de Vasconcellos.
Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos industriais / Morgana de Vasconcellos Araújo. - Campina Grande, 2019.
212 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto.
Referências.

1. Engenharia de Processos - Modelagem. 2. Fabricação Tijolos Cerâmicos - Extração da Matéria Prima. 3. Fabricação Tijolos Cerâmicos - Secagem. 4. Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Farias Neto, Severino Rodrigues de. III. Título.

CDU 691(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE MORGANA DE VASCONCELLOS ARAÚJO 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 24 de Outubro de 2019.

BANCA EXAMINADORA:



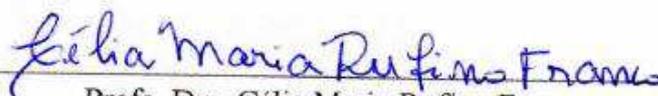
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
UAEM/CCT/UFCG - Orientador



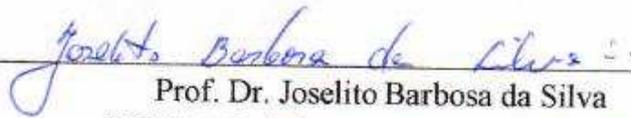
Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
UAEQ/CCT/UFCG - Orientador



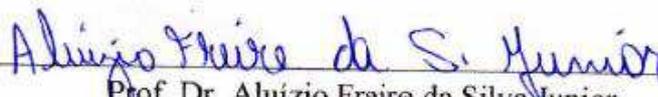
Profa. Dra. Vera Solange de Oliveira Farias
UAFM/CES/UFCG - Examinadora Interna



Profa. Dra. Célia Maria Rufino Franco
UAFM/CES/UFCG - Examinadora Externa



Prof. Dr. Joselito Barbosa da Silva
ECIT de Itabaiana - Examinador Externo



Prof. Dr. Aluizio Freire da Silva Junior
UAFM/CES/UFCG - Examinador Externo

Campina Grande, 24 de Outubro de 2019.
PB - Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais por serem a minha base, pelo amor, por todo o apoio e conselhos. Sem eles, a caminhada seria mais difícil.

Morgana de Vasconcellos Araújo

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus acima de tudo pela saúde física e mental e pela força para lutar todos os dias em busca de meus objetivos e de ser uma pessoa melhor. Sem Ti, Senhor, eu nada sou!

Aos meus pais Marconi e Elba, pelos incentivos, conselhos e preocupações.

À minha família.

Em especial, ao professor Antonio Gilson Barbosa de Lima meus sinceros agradecimentos e eterna gratidão pela orientação, dedicação, incentivo e ensinamentos.

Agradeço também ao professor Severino Rodrigues de Farias Neto, que conduziu meus primeiros passos nessa eterna jornada de pesquisadora e pelo qual tenho um carinho enorme. Obrigada também pelos ensinamentos.

Aos professores Vera Solange de Oliveira Farias, Célia Maria Rufino Franco, Joselito Barbosa da Silva, Aluizio Freire da Silva Junior por aceitarem o convite de compor a banca examinadora, enriquecendo o trabalho com as considerações pessoais.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Aos órgãos CAPES, CNPq, CT Brasil, CTPETRO, FINEP, PETROBRAS e ANP pelo apoio a projetos de pesquisa liberados pelos professores Antonio Gilson Barbosa de Lima e Severino Rodrigues de Farias Neto.

Aos amigos e companheiros de todos os momentos Allyson, Antonildo, Balbina, Brasileiro, Daniel, Gicélia, Guilherme, Hallyson, João Paulo, Mirenia, Robson, Rodrigo, Rosilda, Tony, Valneide, Vanderson, Veralúcia, Verônica, Wanessa e demais amigos pelo apoio, incentivo, compreensão, tempo dedicado, companheirismo, participação na pesquisa e parceria nos projetos.

Aos meus ex alunos, em especial à Alanna, Maria e Niedja pela amizade que se estendeu além da sala de aula.

Às minhas amigas de longa data Mannu, Elô, e demais amigas que estão comigo para o que der e vier.

A todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

“Tudo posso Naquele que me fortalece”.

Filipenses 4:13

RESUMO

ARAÚJO, Morgana de Vasconcellos. **Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos industriais**. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2019. Tese (doutorado).

A fabricação de tijolos cerâmicos envolve as etapas de extração da matéria prima, laminação, secagem e queima do material. A secagem é uma das etapas que possui maior consumo energético, e entender este fenômeno e diminuir os gastos energéticos torna-se crucial. Este trabalho tem como objetivo estudar teoricamente a secagem de tijolos cerâmicos vazados industriais. Uma modelagem matemática avançada para prever as transferências de calor e massa no material ao longo do processo, baseada no modelo da difusão líquida, é apresentada. Resultados das cinéticas de redução de umidade e elevação da temperatura no interior do material são apresentadas. A solução numérica do modelo foi obtida via *software* CFX. Verificou-se que a difusividade mássica varia fortemente com a temperatura e que a posição do tijolo no interior da estufa influencia diretamente nos campos de umidade e de temperatura no interior do tijolo e, conseqüentemente, na qualidade do produto final. Isto significa que além da velocidade, da temperatura e da umidade do ar, a direção de escoamento do ar também afeta a cinética de aquecimento e secagem e a distribuição de calor e umidade no material sólido.

Palavras-chave: modelagem, umidade, temperatura, velocidade, calor, massa.

ABSTRACT

ARAÚJO, Morgana de Vasconcellos. **Numerical simulation via CFD of industrial ceramic brick drying**. Campina Grande: Post Graduate in Process Engineering, Federal University of Campina Grande, 2019. Thesis (PhD).

The manufacture of ceramic bricks involves the steps of extraction of the raw material, lamination, drying and burning of the material. Drying is one of the stages that has the highest energy consumption, and understanding this phenomenon and reducing energy expenditure becomes crucial. This work aims to study theoretically the drying of industrial cast ceramic bricks. An advanced mathematical modeling to predict heat and mass transfer in the material along the process, based on the liquid diffusion model, is presented. Results of moisture reduction and temperature increase kinetics inside the material are presented. The numerical solution of the model was obtained via CFX software. It was found that the mass diffusivity varies strongly with temperature and that the position of the brick inside the kiln directly influences the moisture and temperature fields inside the brick and, consequently, in the quality of the final product. This means that in addition to air velocity, temperature and humidity, the air flow direction also affects the heating and drying kinetics and the distribution of heat and moisture in the solid material.

Keywords: modeling, humidity, temperature, speed, heat, mass.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1.1 Justificativa | 2 |
| 1.2 Objetivo geral..... | 3 |
| 1.3 Objetivos específicos | 3 |
| CAPÍTULO 2 | 5 |
| 2.1 A argila..... | 5 |
| 2.1.1 Origem da argila | 5 |
| 2.1.2 Constituintes da argila | 8 |
| 2.1.3 Tipos de argilas..... | 8 |
| 2.2 A cerâmica | 9 |
| 2.3 Produção de tijolos cerâmicos | 10 |
| 2.4 Secagem de materiais..... | 14 |
| 2.4.1 Comportamento geral na secagem..... | 16 |
| 2.4.2 Teoria da difusão líquida | 20 |
| 2.5 Pesquisas publicadas na área de secagem de materiais cerâmicos | 22 |
| 2.5.1 Estudos experimentais | 22 |
| 2.5.2 Simulação numérica | 25 |
| CAPÍTULO 3 | 31 |
| 3.1 O problema físico e a geometria | 31 |
| 3.1.1 Descrição da estufa e tijolo..... | 32 |
| 3.1.2 Domínio de estudo e computacional | 32 |
| 3.2 Modelagem matemática | 34 |
| 3.2.1 Equações constitutivas..... | 34 |
| 3.2.1.1 Fase sólida | 34 |
| 3.2.1.2 Fase fluida | 35 |
| 3.2.1.3 Interface entre as fases fluidas e sólidas..... | 36 |

| | | |
|----------------------------------|---|-----|
| 3.2.2 | Condições iniciais e de contorno | 37 |
| 3.2.3 | Propriedades físico-químicas do fluido e sólido..... | 38 |
| 3.2.4 | Casos simulados | 39 |
| 3.2.4.1 | Teste de malha..... | 39 |
| 3.2.4.2 | Aplicação e secagem de tijolo cerâmico industrial | 41 |
| CAPÍTULO 4 | | 45 |
| 4.1 | Teste de dependência de malha..... | 46 |
| 4.2 | Aplicação da secagem do tijolo na estufa..... | 48 |
| 4.2.1 | Análise termo-gravimétrica e estimação de parâmetros de processo: validação 48 | |
| 4.2.1.1 | Cinética de aquecimento do tijolo..... | 48 |
| 4.2.1.2 | Cinética de secagem do tijolo..... | 52 |
| 4.2.1.3 | Estimação dos parâmetros de transporte | 54 |
| 4.2.2 | Perfis de temperatura e teor de umidade no tijolo | 58 |
| 4.2.2.1 | Curva de temperatura no interior do tijolo | 60 |
| 4.2.2.2 | Curvas do teor de umidade no interior do tijolo..... | 70 |
| 4.2.3 | Distribuição dos parâmetros de transporte no tijolo | 80 |
| 4.2.3.1 | Campo de temperatura no tijolo | 81 |
| 4.2.4 | Campo do teor de umidade no tijolo | 108 |
| 4.2.5 | Distribuição dos parâmetros de transporte no ar | 134 |
| 4.2.5.1 | Campo de temperatura do ar | 134 |
| 4.2.5.2 | Campo de massa de água | 143 |
| 4.2.5.3 | Campo de velocidade do ar | 156 |
| 4.2.5.4 | Campo de pressão..... | 164 |
| CAPÍTULO 5 | | 166 |
| 5.1 | Conclusões | 166 |
| 5.2 | Sugestões para futuras pesquisas | 167 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 168 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Transformações da rocha | 6 |
| Figura 2.2: Solo formado por Terra Roxa. | 6 |
| Figura 2.3: Argila Secundária..... | 7 |
| Figura 2.4: Cerâmica Marajoara..... | 7 |
| Figura 2.5: Mina de mármore Carrara..... | 7 |
| Figura 2.6: Cadeia produtiva do tijolo cerâmico. | 11 |
| Figura 2.7: Processo de extrusão de tijolos. | 12 |
| Figura 2.8: Galpão de secagem de tijolos cerâmicos..... | 13 |
| Figura 2.9: Forno túnel para queima de telhas e tijolos..... | 14 |
| Figura 2.10: Escalas naturais de alguns produtos importantes na indústria de secagem..... | 15 |
| Figura 2.11: Processos de troca na secagem de materiais. | 16 |
| Figura 2.12: Curva genérica do teor de umidade em processos de secagem de materiais. | 18 |
| Figura 2.13: Taxa de secagem em função do teor de umidade em processos de secagem de materiais..... | 19 |
| Figura 2.14: Tipos de umidade envolvidos na secagem de sólidos..... | 20 |
| Figura 2.15: Secagem de tijolo poroso ($T_F = 50^\circ\text{C}$, $U_{rel} = 14\%$ e $\bar{U} = 3\text{m/s}$): (A) Taxa de secagem, (B) saturação da superfície e (C) temperatura da superfície..... | 23 |
| Figura 2.16: Condições de contorno do secador industrial de fluxo cruzado..... | 23 |
| Figura 2.17: Amostra cilíndrica deteriorada de altura 49 mm e diâmetro 33 mm. | 25 |
| Figura 2.18: Distribuição interna de umidade em uma amostra seca com aquecimento controlado por micro-ondas em 122 min de secagem. | 25 |
| Figura 2.19: Número de artigos sobre tecnologia de secagem e sua relação com métodos computacionais avançados, obtidos a partir da Scopus, em função do tempo. | 26 |
| Figura 3.1: Estufa com circulação de ar forçada | 32 |
| Figura 3.2: Esquema de funcionamento da estufa com circulação de ar forçada..... | 32 |
| Figura 3.3: Foto do tijolo cerâmico vazado, no instante inicial, utilizado para secagem em estufa a 50°C | 32 |
| Figura 3.4: Geometria representativa do tijolo cerâmico | 33 |
| Figura 3.5: Geometria representativa da estufa com tijolo cerâmico | 33 |
| Figura 3.6: Malha hexaédrica gerada sobre o tijolo com um de seus refinamentos..... | 34 |
| Figura 3.7: Malha numérica sobre o domínio da estufa com tijolo contendo 673.625 elementos hexaédricos..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.8: Geometria com as arestas denominadas para o teste de dependência de malha. .40 | 40 |
| Figura 4.1: Massa de água média no tijolo em função do tempo para diferentes malhas.47 | 47 |
| Figura 4.2: Temperatura no vértice do tijolo em função do tempo para diferentes malhas. ..47 | 47 |
| Figura 4.3: Vértice para a obtenção da variação da temperatura do tijolo48 | 48 |
| Figura 4.4: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$).49 | 49 |
| Figura 4.5: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$).49 | 49 |
| Figura 4.6: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$).49 | 49 |
| Figura 4.7: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$).50 | 50 |
| Figura 4.8: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$).50 | 50 |
| Figura 4.9: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 100^{\circ}\text{C}$). ...50 | 50 |
| Figura 4.10: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$).52 | 52 |
| Figura 4.11: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$).52 | 52 |
| Figura 4.12: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$).53 | 53 |
| Figura 4.13: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$).53 | 53 |
| Figura 4.14: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$).53 | 53 |
| Figura 4.15: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 100^{\circ}\text{C}$).54 | 54 |
| Figura 4.16: Difusividade mássica no tijolo em função do inverso da temperatura.56 | 56 |
| Figura 4.17: Difusividade mássica do tijolo em função da temperatura de secagem.....57 | 57 |
| Figura 4.18: Linhas de análise no domínio sólido (a) horizontais e (b) vertical59 | 59 |
| Figura 4.19: Temperatura no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 50°C60 | 60 |
| Figura 4.20: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 50°C61 | 61 |
| Figura 4.21: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 990 min de secagem a 50°C61 | 61 |
| Figura 4.22: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 990 min de secagem a 50°C62 | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.23: Temperaturas no interior do tijolo ao longo das linhas horizontais após 10 minutos de secagem a 60°C..... | 63 |
| Figura 4.24: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 60°C. | 64 |
| Figura 4.25: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 820 min de secagem a 60°C. | 64 |
| Figura 4.26: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 820 min de secagem a 60°C. | 64 |
| Figura 4.27: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 70°C. | 65 |
| Figura 4.28: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 70°C. | 65 |
| Figura 4.29: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 950 min de secagem a 70°C. | 65 |
| Figura 4.30: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 950 min de secagem a 70°C. | 66 |
| Figura 4.31: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 80°C. | 66 |
| Figura 4.32: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 80°C. | 66 |
| Figura 4.33: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 900 min de secagem a 80°C. | 67 |
| Figura 4.34: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 990 min de secagem a 80°C. | 67 |
| Figura 4.35: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 90°C. | 67 |
| Figura 4.36: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 90°C. | 68 |
| Figura 4.37: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 690 min de secagem a 90°C. | 68 |
| Figura 4.38: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 690 min de secagem a 90°C. | 68 |
| Figura 4.39: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 100°C. | 69 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.40: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 100°C. | 69 |
| Figura 4.41: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 860 min de secagem a 100°C. | 69 |
| Figura 4.42: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 860 min de secagem a 100°C. | 70 |
| Figura 4.43: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 50°C. | 71 |
| Figura 4.44: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 50°C. | 71 |
| Figura 4.45: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 990 min de secagem a 50°C. | 71 |
| Figura 4.46: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 990 min de secagem a 50°C..... | 72 |
| Figura 4.47: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 60°C. | 72 |
| Figura 4.48: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 60°C. | 72 |
| Figura 4.49: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 820 min de secagem a 60°C. | 73 |
| Figura 4.50: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 820 minutos de secagem a 60°C..... | 73 |
| Figura 4.51: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 70°C. | 73 |
| Figura 4.52: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 70°C. | 74 |
| Figura 4.53: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 950 min de secagem a 70°C. | 74 |
| Figura 4.54: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 950 minutos de secagem a 70°C..... | 74 |
| Figura 4.55: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 80°C. | 75 |
| Figura 4.56: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 80°C. | 75 |
| Figura 4.57: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 900 min de secagem a 80°C. | 75 |
| Figura 4.58: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 990 min de secagem a 80°C..... | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.59: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 90°C. | 76 |
| Figura 4.60: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 90°C. | 76 |
| Figura 4.61: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 690 min de secagem a 90°C. | 77 |
| Figura 4.62: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 690 minutos de secagem a 90°C. | 77 |
| Figura 4.63: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 100°C. | 77 |
| Figura 4.64: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 100°C. | 78 |
| Figura 4.65: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 860 min de secagem a 100°C. | 78 |
| Figura 4.66: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 860 minutos de secagem a 100°C. | 78 |
| Figura 4.67: Planos de análise sobre os domínios fluido e sólido. | 80 |
| Figura 4.68: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 50°C. | 82 |
| Figura 4.69: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 60°C. | 83 |
| Figura 4.70: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 70°C. | 84 |
| Figura 4.71: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 80°C. | 85 |
| Figura 4.72: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 90°C. | 86 |
| Figura 4.73: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 100°C. | 87 |
| Figura 4.74: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 50°C. | 89 |
| Figura 4.75: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 60°C. | 90 |
| Figura 4.76: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 70°C. | 91 |
| Figura 4.77: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 80°C. | 92 |
| Figura 4.78: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 90°C. | 93 |
| Figura 4.79: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 100°C. | 94 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.80: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 50°C. | 95 |
| Figura 4.81: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 60°C. | 96 |
| Figura 4.82: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 70°C. | 97 |
| Figura 4.83: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 80°C. | 98 |
| Figura 4.84: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 90°C. | 99 |
| Figura 4.85: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 100°C..... | 100 |
| Figura 4.86: Plano YZ. | 101 |
| Figura 4.87: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 50°C. | 102 |
| Figura 4.88: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 60°C. | 103 |
| Figura 4.89: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 70°C. | 104 |
| Figura 4.90: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 80°C. | 105 |
| Figura 4.91: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 90°C. | 106 |
| Figura 4.92: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 100°C. | 107 |
| Figura 4.93: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 50°C..... | 109 |
| Figura 4.94: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 60°C..... | 110 |
| Figura 4.95: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 70°C..... | 111 |
| Figura 4.96: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 80°C..... | 112 |
| Figura 4.97: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 90°C..... | 113 |
| Figura 4.98: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 100°C...114 | |
| Figura 4.99: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 50°C..... | 116 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.100: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 60°C. | 117 |
| Figura 4.101: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 70°C. | 118 |
| Figura 4.102: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 80°C. | 119 |
| Figura 4.103: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 90°C. | 120 |
| Figura 4.104: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 100°C. | 121 |
| Figura 4.105: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 50°C. | 122 |
| Figura 4.106: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 60°C. | 123 |
| Figura 4.107: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 70°C. | 124 |
| Figura 4.108: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 80°C. | 125 |
| Figura 4.109: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 90°C. | 126 |
| Figura 4.110: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 100°C. | 127 |
| Figura 4.111: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 50°C. | 128 |
| Figura 4.112: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 60°C. | 129 |
| Figura 4.113: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 70°C. | 130 |
| Figura 4.114: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 80°C. | 131 |
| Figura 4.115: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 90°C. | 132 |
| Figura 4.116: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 100°C. | 133 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.117: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 10 min)..... | 134 |
| Figura 4.118: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 60 min)..... | 135 |
| Figura 4.119: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 990 min)..... | 135 |
| Figura 4.120: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 10 min)..... | 136 |
| Figura 4.121: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 60 min)..... | 136 |
| Figura 4.122: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 820 min)..... | 137 |
| Figura 4.123: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 10 min)..... | 137 |
| Figura 4.124: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 60 min)..... | 138 |
| Figura 4.125: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 950 min)..... | 138 |
| Figura 4.126: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 10 min)..... | 139 |
| Figura 4.127: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 60 min)..... | 139 |
| Figura 4.128: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 900 min)..... | 140 |
| Figura 4.129: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 10 min)..... | 140 |
| Figura 4.130: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 60 min)..... | 141 |
| Figura 4.131: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 690 min)..... | 141 |
| Figura 4.132: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 10 min)..... | 142 |
| Figura 4.133: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 60 min)..... | 142 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.134: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 860 min)..... | 143 |
| Figura 4.135: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 0 min)..... | 144 |
| Figura 4.136: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 10 min)..... | 144 |
| Figura 4.137: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 60 min)..... | 145 |
| Figura 4.138: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 990 min)..... | 145 |
| Figura 4.139: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 0 min)..... | 146 |
| Figura 4.140: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 10 min)..... | 146 |
| Figura 4.141: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 60 min)..... | 147 |
| Figura 4.142: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 820 min)..... | 147 |
| Figura 4.143: Campo de massa de água no interior da estufa(Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 0 min)..... | 148 |
| Figura 4.144: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 10 min)..... | 148 |
| Figura 4.145: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 60 min)..... | 149 |
| Figura 4.146: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 950 min)..... | 149 |
| Figura 4.147: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 0 min)..... | 150 |
| Figura 4.148: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 10 min)..... | 150 |
| Figura 4.149: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 60 min)..... | 151 |
| Figura 4.150: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem 80°C (t = 900 min)..... | 151 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.151: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 0 min)..... | 152 |
| Figura 4.152: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 10 min)..... | 152 |
| Figura 4.153: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 60 min)..... | 153 |
| Figura 4.154: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 690 min)..... | 153 |
| Figura 4.155: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 0 min)..... | 154 |
| Figura 4.156: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 10 min)..... | 154 |
| Figura 4.157: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 60 min)..... | 155 |
| Figura 4.158: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 860 min)..... | 155 |
| Figura 4.159: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 10 min)..... | 156 |
| Figura 4.160: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 10 min)..... | 157 |
| Figura 4.161: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 10 min)..... | 157 |
| Figura 4.162: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 10 min)..... | 158 |
| Figura 4.163: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 10 min)..... | 158 |
| Figura 4.164: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 10 min)..... | 159 |
| Figura 4.165: Campo vetorial do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 10 min)..... | 160 |
| Figura 4.166: Campo vetorial do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 10 min)..... | 160 |
| Figura 4.167: Linhas de corrente no interior da estufa para a secagem a 50°C (t = 10 min). | 161 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.168: Planos XY e YZ para as linhas de corrente. | 161 |
| Figura 4.169: Campo vetorial do ar no interior da estufa (Plano XY) para a secagem a 100°C (t = 10 min)..... | 162 |
| Figura 4.170: Campo vetorial do ar no interior da estufa (Plano YZ) para a secagem a 100°C (t = 10 min)..... | 162 |
| Figura 4.171: Linhas de corrente no interior da estufa (Plano XY) para a secagem a 100°C (t = 10 min). | 163 |
| Figura 4.172: Linhas de corrente no interior da estufa (Plano YZ) para a secagem a 100°C (t = 10 min). | 163 |
| Figura 4.173: Detalhes das linhas de corrente na entrada dos orifícios do tijolo para a secagem a 100°C (t = 10 min)..... | 164 |
| Figura 4.174: Campo de pressão no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 10 min)..... | 165 |
| Figura 4.175: Campo de gradiente de pressão ao longo do eixo X no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 10 min)..... | 165 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 3-1: Dados de refinamento da malha numérica. | 40 |
| Tabela 3-2: Dados úteis para as simulações numéricas do teste de malha..... | 41 |
| Tabela 3-3: Dados úteis para as simulações numéricas da secagem do tijolo cerâmico | 43 |
| Tabela 4-1: Resultados do teste de dependência de malha..... | 46 |
| Tabela 4-2: Parâmetros estatísticos obtidas na análise da transferência de calor..... | 51 |
| Tabela 4-3: Análise estatística obtida para análise da transferência de massa | 54 |
| Tabela 4-4: Análise coeficientes de transferência de massa convectiva | 58 |
| Tabela 4-5: Variações de temperatura máxima na Linha 1 | 62 |
| Tabela 4-6: Variações de temperatura máxima na Linha 2 | 62 |
| Tabela 4-7: Variações de temperatura máxima na Linha 3 | 63 |
| Tabela 4-8: Variações de temperatura máxima na Linha 4 | 63 |
| Tabela 4-9: Variações máximas do teor de umidade em base seca na Linha 1 | 79 |
| Tabela 4-9: Variações máximas do teor de umidade em base seca na Linha 2..... | 79 |
| Tabela 4-9: Variações máximas do teor de umidade em base seca na Linha 3..... | 80 |
| Tabela 4-9: Variações máximas do teor de umidade em base seca na Linha 4..... | 80 |
| Tabela 4-13: Variações de temperatura máximas no interior do tijolo (Plano XZ). | 88 |
| Tabela 4-14: Gradientes máximos de temperatura no interior do tijolo (Planos XY e YZ).101 | |
| Tabela 4-15: Gradientes máximos do teor de umidade no interior do tijolo (Planos XZ, XY e YZ)..... | 115 |

NOMENCLATURA

Letras Latinas

| | | |
|----------------------|--|---------------------|
| c_S | Calor específico do sólido | [J/(kg.K)] |
| D_0 | Fator de Arrhenius | [m ² /s] |
| D_{mf} | Coeficiente de difusão mássico no ar | [m ² /s] |
| D_{ms} | Coeficiente de difusão mássico no sólido | [m ² /s] |
| E_A | Energia de ativação para a difusão | [kJ/(kmol.K)] |
| E_M | Erro médio | [-] |
| H | Entalpia | [J] |
| H_f | Entalpia do ar | [J] |
| H_s | Entalpia da fase sólida | [J] |
| h_c | Coeficiente de transferência de calor convectiva | [W/(m.K)] |
| h_m | Coeficiente de transferência de massa convectiva | [m/s] |
| M | Teor de umidade | [kg/kg] |
| M' | Taxa de secagem | [kg/s] |
| M_e | Umidade de equilíbrio | [kg/kg] |
| M_{max} | Teor de umidade máximo | [kg/kg] |
| M_o | Umidade em base seca inicial | [kg/kg] |
| $MM_{ar\ seco}$ | Massa molar de ar seco | [kg/kmol] |
| MM_{vapor} | Massa molar de vapor de água | [kg/kmol] |
| m | Massa de água | [g] |
| $m_{ar\ seco}$ | Massa de ar seco | [g] |
| $\dot{m}_{ar\ seco}$ | Vazão mássica de ar seco | [g/s] |
| $m_{eq-interface}$ | Massa de água no equilíbrio na interface | [g] |
| $m_{interface}$ | Massa de água instantânea na interface | [g] |
| m_{f_in} | Massa de água inicial no ar | [g] |
| m_{s_eq} | Massa de água no tijolo no equilíbrio | [g] |
| m_{s_in} | Massa de água inicial no tijolo | [g] |
| m_{tijolo_seco} | Massa do tijolo seco | [g] |
| m_{vapor} | Massa de vapor de água | [g] |
| \dot{m}_{vapor} | Vazão mássica de vapor de água | [g/s] |
| n | Número de medidas efetuadas | [-] |

| | | |
|---------------------|---|---------------------|
| n_p | Número de parâmetros ajustados | [-] |
| P | Pressão do sistema | [Pa] |
| $P_{ar\ seco}$ | Pressão do ar seco | [Pa] |
| P_{vapor} | Pressão de vapor | [Pa] |
| P_{vapor}^{Sat} | Pressão de vapor no ponto de saturação | [Pa] |
| R | Constante dos gases | [kJ/(kmol.K)] |
| r_p | Coefficiente de correlação de Pearson | [-] |
| S_M | Termo fonte do momento linear | [kg.m/s] |
| T | Temperatura absoluta | [°C ou K] |
| $T_{eq_interface}$ | Temperatura de equilíbrio na interface | [°C] |
| T_{ext} | Temperatura externa | [°C] |
| T_{f_in} | Temperatura inicial do ar | [°C] |
| $T_{interface}$ | Temperatura instantânea na interface | [°C] |
| T_{max} | Temperatura máxima | [°C] |
| T_{s_in} | Temperatura inicial do tijolo | [°C] |
| T^{sat} | Temperatura de saturação | [°C ou K] |
| t | Tempo | [min ou s] |
| U | Vetor velocidade | [m/s] |
| U_{rel} | Umidade relativa | [-] |
| V_{Exp} | Valor experimental | |
| V_{Num} | Valor numérico | |
| $W_{ar\ seco}$ | Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa | [m ³ /s] |

Letras Gregas

| | | |
|---------------|--|-------------------------|
| δV^2 | Variância dos quadrados dos resíduos | |
| ε | Taxa de dissipação da energia | [J/s] |
| κ | Energia cinética turbulenta | [J] |
| λ_f | Condutividade térmica do ar | [W/(m ² .K)] |
| λ_S | Condutividade térmica do material sólido | [W/(m ² .K)] |
| μ | Viscosidade dinâmica | [Pa.s] |
| μ_{eff} | Viscosidade dinâmica efetiva | [Pa.s] |
| μ_t | Viscosidade dinâmica turbulenta | [Pa.s] |

| | | |
|----------|--------------------------------------|----------------------|
| ρ | Massa específica | [kg/m ³] |
| ρ_f | Massa específica do fluido (ar seco) | [kg/m ³] |
| ρ_s | Massa específica do sólido (tijolo) | [kg/m ³] |
| ω | Razão de mistura | [-] |

Operadores matemáticos

∇ Gradiente

Subscritos

f Fluido

s Sólido

LISTA DE SIGLAS

ABCERAM - Associação Brasileira de Cerâmica

ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica

CFD – *Computational Fluid Dynamic* (Fluidodinâmica Computacional)

ERMQ – Erro relativo

ICEMEG - Industria e Comercio de Equipamentos Metalúrgicos

RAM – Memória de acesso aleatório

RANS – Equações médias de Navier-Stokes

RMS - *Root Mean Squared* (Valor Quadrático Médio)

UAEM – Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O processo de secagem possui larga aplicação industrial e tem sido destinado a diferentes materiais, tais como: grãos, frutas, vegetais, madeira, produtos cerâmicos, dentre outros. A operação consiste em remover a umidade dos materiais de maneira cautelosa, de modo a preservar a sua qualidade no final do processo.

A secagem é uma das operações unitárias de maior complexidade e consumo energético. Sendo assim, a otimização de tecnologias de secagem existentes ou a criação de novas tecnologias que visam diminuir os gastos energéticos e o tempo necessário para se atingir a umidade desejada no produto, com controle de qualidade do material torna-se extremamente importante.

A tecnologia de simulação numérica para reproduzir o estudo experimental da secagem possui diversas vantagens sobre os trabalhos experimentais realizados em laboratórios e em plantas-piloto. Dentre elas pode-se citar (Defraeye, 2014):

- a) A capacidade preditiva da modelagem permite o projeto e a otimização de secadores ou de processos de secagem sem necessariamente ter que construir um protótipo, diminuindo custos;
- b) Na simulação numérica o estudo pode ser feito na escala real, sem a necessidade de redução de escala;
- c) A sensibilidade às mudanças de temperatura e umidade é maior, eliminando as incertezas de testes experimentais;
- d) A facilidade em observar campos de temperatura e umidade sobre e dentro do material ao longo da secagem, enquanto que no estudo experimental são necessários equipamentos de alta complexidade para o procedimento, acarretando em alto custo de análise.
- e) A possibilidade de quantificar os fluxos de calor e massa ao longo do tempo e do espaço.

O setor de produção de produtos cerâmicos de argila vermelha (blocos, tijolos e telhas) está entre os seguimentos que necessitam de melhoria na qualidade. A manufatura de um produto cerâmico argiloso envolve a extração de matéria-prima, moldagem, secagem e queima. Apesar do processo de fabricação do material cerâmico ser aparentemente simples,

ainda existem no mercado produtos de baixa qualidade, oriundos de secagem ou queima sem controle adequado, apresentando trincas, deformações ou empenamentos ao final do processo. No produto final são verificados fatores como resistência e absorção de água quando em operação. Um tijolo de baixa qualidade pode se quebrar facilmente, provocando desperdício, e na obra pode ser a causa principal de rachaduras na parede, resultando em infiltrações e comprometendo a estrutura da obra (Ferreira, 2015). Deste modo, o controle de qualidade dos processos de secagem e queima é de extrema importância na qualidade final do produto.

Se no processo de fabricação do produto cerâmico a taxa de secagem for muito elevada, é possível que se estabeleça grandes diferenças no teor de umidade no interior do material que pode provocar trincas ou empenamentos. Em outros casos, é possível que se forme uma superfície relativamente impermeável de material parcialmente seco devido à contração das partículas nesta superfície, inibindo o prosseguimento da secagem no interior e que pode acentuar variações de teores de umidade da amostra, com o conseqüente realce da tendência de o sólido deteriorar-se. Foust *et al.* (1982) ressaltam que as condições de secagem devem ser escolhidas tendo em vista, primordialmente, os efeitos que podem ter sobre a qualidade do produto, sobre a economia do processo ou sobre a comodidade da operação.

Quando os materiais cerâmicos, como o tijolo, são fabricados com processo otimizado, isto é, menores tempo de produção e desperdício de matéria-prima, estes podem chegar ao consumidor final com um preço mais acessível.

1.1 Justificativa

Diversos trabalhos sobre secagem de tijolos cerâmicos têm sido reportados na literatura (Cadé *et al.*, 2005; Batista *et al.*, 2008; Batista *et al.*, 2009; Silva, J. *et al.*, 2012; Nascimento *et al.*, 2015). Notadamente estes trabalhos estão voltados para a secagem de tijolos em escala de laboratório. Raros são os trabalhos relacionados a tijolos em escala industrial e, principalmente, usando a termofluidodinâmica computacional. Além disso, percebe-se também a escassez de pesquisas dos fenômenos de transferência de calor, massa e escoamento de fluido ocorrentes no ambiente de secagem, já que é obtido experimentalmente o efeito do ar de secagem no tempo de processo e na qualidade do produto final.

Um conhecimento mais aprofundado e, conseqüentemente, modificações mais precisas no processo com o intuito de otimização tornam-se essenciais. Neste contexto, o uso da ferramenta da Fluidodinâmica Computacional, do inglês CFD, para análise do processo de secagem de tijolos cerâmicos é bastante válido, principalmente devido à precisão e visualização de dados quando comparado com o estudo experimental da secagem.

Metodologicamente, a principal contribuição do trabalho consiste em simular numericamente o meio externo ao produto onde acontece a perda de umidade, fazendo com que variáveis que antes eram preditas, como por exemplo os coeficientes de transferência de calor e massa por convecção, sejam calculadas pelo *software* a partir da velocidade e temperatura do ar que circunda o tijolo cerâmico, tornando o processo mais realista. Desta forma, é possível mudar as condições do meio de secagem e verificar como essas condições interferem no processo. A simulação com o meio externo permite verificar se existe simetria de umidade e temperatura no interior da amostra durante o processo de secagem, como reportado na literatura (Cadé *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2011; Khalili *et al.*, 2014; Brito *et al.*, 2016).

O propósito desta pesquisa é trazer significativa contribuição científica ao avanço tecnológico na indústria cerâmica, buscando uma melhor eficiência do processo de secagem industrial, priorizando a qualidade do produto final. Pretende-se obter um processo de secagem otimizado, com mínimo custo energético e evitando ou amenizando desperdícios de matérias-primas.

1.2 Objetivo geral

Estudar a secagem de tijolos cerâmicos vazados industriais via simulação numérica usando as leis de Fick (difusão de massa) e Fourier (condução de calor) para descrever o processo de secagem, com abordagem tridimensional.

1.3 Objetivos específicos

Como objetivos específicos pode-se citar:

- a) Propor uma nova metodologia de estudo da secagem de materiais a partir da simulação numérica, não apenas no domínio sólido, mas também no domínio fluido que circunda a amostra;

- b) Apresentar uma modelagem matemática tridimensional e transiente, baseando-se nos balanços de momento linear, massa e energia, para descrever as transferências de calor e massa entre o ar e o tijolo cerâmico, e escoamento de ar sobre o tijolo;
- c) Simular numericamente, via Ansys CFX[®], as cinéticas de aquecimento e perda de massa, bem como as distribuições de umidade, temperatura no material ao longo do processo, em várias condições de processo;
- d) Avaliar o comportamento termofluidodinâmico e gravimétrico do ar de secagem durante o processo de secagem;
- e) Comparar os resultados numéricos com dados experimentais da literatura para avaliar a previsibilidade do modelo quanto ao processo real e validar a metodologia matemática desenvolvida;
- f) Estudar o efeito das condições do ar de secagem sobre difusividade mássica no interior do material;
- g) Propor uma equação matemática para descrever a dependência da difusividade mássica do tijolo cerâmico com a temperatura do ar de secagem.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A argila

A argila é a matéria-prima básica dos produtos cerâmicos e é composta por grande quantidade de material amorfo, predominando o material cristalino. Os cristais da argila podem agrupar-se em espécies mineralógicas bem definidas. Sob o ponto de vista fisicoquímico, as argilas podem ser consideradas como sistemas dispersos de minerais nos quais predominam partículas de diâmetro abaixo de 2 μm (Silva, 2009).

2.1.1 Origem da argila

Rocha é uma associação natural de minerais (corpo natural sólido e cristalino formado da interação de processos físico-químicos em ambientes geológicos) ou mineraloides (materiais de origem geológica que apresentam características semelhantes às dos minerais, mas não são cristalinos) em proporções definidas e que ocorre em uma extensão considerável. Para ser considerada como uma rocha, esse agregado tem que ter representatividade à escala cartográfica (ter volume suficiente) e ocorrer repetidamente no espaço e no tempo, ou seja, o fenômeno geológico que forma a rocha ser suficientemente importante na história geológica para se dizer que faz parte da dinâmica da Terra. As rochas podem ser agrupadas em três grandes grupos, conforme o processo de formação: ígneas, metamórficas ou sedimentares. As rochas sedimentares constituem apenas 5% da crosta terrestre, os restantes 95% são de rochas ígneas ou metamórficas (Branco, 2015).

As rochas pela ação do tempo, passam por metamorfose e se transformam em argila. Quando sofrem intempéries, se desagregam e dão origem à areia. Quando a rocha passa pelo processo de britagem, transforma-se em brita (Figura 2.1) Watanabe (2015).

A metamorfose que gera a argila consiste na alteração celular sofrida pela rocha, em especial as feldspática, resultando em materiais de baixa cristalinidade. Uma das argilas mais famosas é a Terra Roxa (Figura 2.2), que é fina, vermelha e que contém altos teores de ferro e outros minerais, sendo ótima para a agricultura. O Brasil é o país que possui a maior reserva mundial de terras roxa e, praticamente, todo o solo dos estados de São Paulo, Paraná,

Santa Catarina e Mato Grosso é formado por este tipo de argila. No Brasil também se destacam os solos de Massapé, Salmourão e de aluviais (Watanabe, 2018).

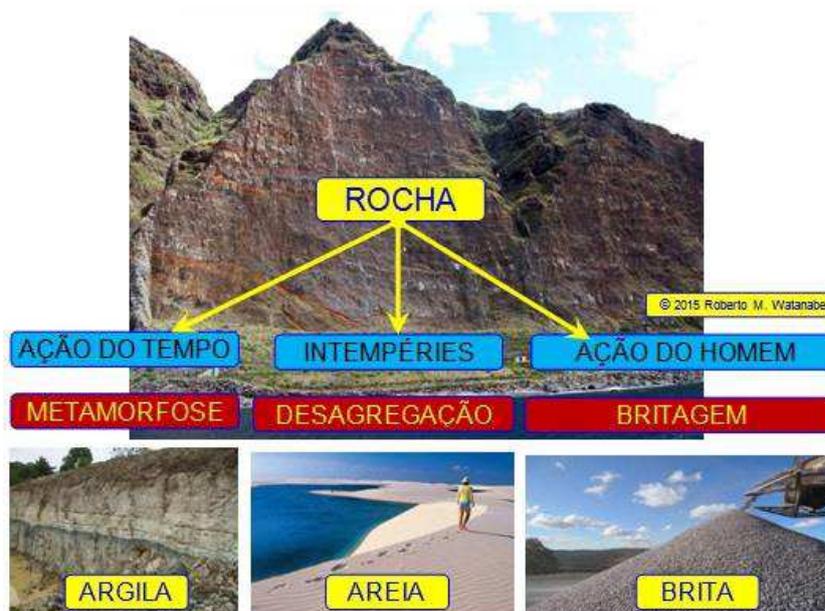


Figura 2.1: Transformações da rocha
Fonte: Watanabe (2018).



Figura 2.2: Solo formado por Terra Roxa.
Fonte: Watanabe (2018).

A argila é inicialmente classificada em Argila Primária e em Argila Secundária. A Argila primária permanece no local em que foi formada. A Argila Secundária é formada em uma região e é levada pelas águas da chuva e pelo vento, sendo depositada nos fundos de vales. Esta recebe as cores dos materiais que vai encontrando no meio do caminho por onde passa, como ilustra a Figura 2.3.

A argila é um material elástico e plástico com alta coesão interna, o que o torna viscoso e com efeito plastificante na presença de água e, por isso mesmo, adequado para ser moldado. A técnica de secar e queimar objetos de argila já era conhecida desde a pré-

história. Neste contexto, alguns povos primitivos deixaram marcas da sua existência em peças cerâmicas, como a mundialmente famosa Cerâmica Marajoara (Figura 2.4). Quando depósitos de argila voltam a sofrer ação da pressão e temperatura, podem resultar em novas rochas como o mármore, alguns muito claros como o de Carrara (Figura 2.5).



Figura 2.3: Argila Secundária.
Fonte: Watanabe (2018).



Figura 2.4: Cerâmica Marajoara.
Fonte: Watanabe (2018).



Figura 2.5: Mina de mármore Carrara.
Fonte: Watanabe (2018).

2.1.2 Constituintes da argila

Os seguintes constituintes da argila, podem ser citados (Silva, 2009):

- Silicatos: são os principais constituintes das argilas e sua unidade fundamental é o tetraedro sílico-oxigênio;
- Minerais do grupo caulinita: fazem parte da maioria das argilas e têm forma de placas hexagonais irregulares;
- Minerais do grupo montmorilonita ou esmecita: são geralmente encontrados nas bentonitas que são rochas derivadas de cinzas vulcânicas e são facilmente penetráveis pela água, a qual provoca seu inchamento;
- Minerais micáceos: as micas são encontradas em muitas argilas, argilitos e xistos;
- Minerais de alumínio hidratados: Gibsita, constituintes dos solos lateríticos, é o principal mineral de alumínio, sendo o mesmo uma mistura de bauxita, caulinita, limonita e outros minerais.

2.1.3 Tipos de argilas

De acordo com Silva (2009), as argilas são classificadas em vários tipos:

- Argila natural: é extraída e limpa, e usada em seu estado natural sem a adição de outras substâncias.
- Argila refratária: é resistente ao calor e é usada nas massas cerâmicas para dar maior plasticidade e resistência em altas temperaturas, sendo muito aplicadas na produção de placas refratárias que atuam como isolantes e revestimentos para fornos. Geralmente possuem alguma proporção de ferro e se encontram associadas com os depósitos de carvão;
- Caulim ou argila da china: argila primária, utilizada na fabricação de massas para porcelanas, possui coloração branca, funde-se à 1800°C e é pouco plástica, devendo ser moldada em formas;
- Argilas de bola (*Ball Clay*): são argilas secundárias muito plásticas, de cor azulada ou negra, apresentando alto grau de contração tanto na secagem quanto na queima. Vitrificam à 1300°C.
- Argilas para grés: é uma argila de grão fino, plástica, sedimentária e refratária. Vitrificam entre 1250 e 1300°C. O feldspato atua como material fundente e após a

queima sua coloração varia do vermelho escuro ao rosado e até mesmo, acinzentado do claro ao escuro;

- Argilas vermelhas: são argilas plásticas com alto teor de ferro e sua coloração é avermelhada escuro quando úmida chegando quase ao marrom. Resistem a temperaturas de até 1100°C;
- Bentonita: argila vulcânica muito plástica e pode aumentar entre 10 e 15 vezes seu volume ao entrar em contato com a água e funde-se por volta de 1200°C;
- Argilas expandidas: são produzidas em grandes fornos rotativos, se expandindo a altas temperaturas (1100°C). Suas principais características são: leveza, resistência mecânica, inércia química (ambientes ácidos e alcalinos), estabilidade dimensional, incombustibilidade, além de possuírem excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico.

2.2 A cerâmica

A cerâmica é o material artificial mais antigo. Do grego "kéramos" ("terra queimada" ou "argila queimada"), é um material de grande resistência, muitas vezes encontrado em escavações arqueológicas (Anfacer, 2019).

O homem ao sair das cavernas e se tornar um fazendeiro, encontrou a necessidade de buscar abrigo, mas também observou a precisão de tigelas para armazenar água, alimentos colhidos e sementes para a próxima safra. Esses vasos deveriam ser resistentes, impermeáveis e fáceis de fabricar. Esses objetos foram encontrados em argila, deixando pistas sobre civilizações e culturas que existiam milhares de anos antes da era cristã (Anfacer, 2019).

A cerâmica é produzida a partir da argila, que se torna muito plástica e fácil de moldar quando molhada. Após ter sido submetida a secagem para remover a maior porção de água, a parte moldada é submetida a altas temperaturas (cerca de 1000°C), o que lhe confere rigidez e resistência por derretimento de certos componentes da massa e, em alguns casos, fixação dos esmaltes à superfície (Anfacer, 2019).

Essas propriedades permitiram que a cerâmica fosse usada na construção de casas, recipientes para uso doméstico e armazenamento de alimentos, vinhos, óleos, perfumes, na construção de urnas funerárias e até mesmo como superfície de escrita. Os materiais cerâmicos possuem muitas aplicações nas mais diversas áreas de engenharia e são especiais devido às suas propriedades, como altos pontos de fusão, baixa condutividade elétrica e

térmica e altas forças de compressão. Além disso, eles são geralmente rígidos e quebradiços, com boa estabilidade química e térmica (Anfacer, 2019).

A indústria cerâmica tradicional se originou há muito tempo, e hoje existem muitas divisões nesta indústria, como as de cerâmica, azulejos, produtos de argila estrutural, refratários, blocos e porcelana elétrica. Neste tipo de indústria, os produtos cerâmicos não devem necessariamente encontrar propriedades rígidas específicas, e as tecnologias baratas podem ser usadas na produção. Cada matéria-prima contribui com certas propriedades, tais como resistência a seco, plasticidade, encolhimento, etc., ao corpo cerâmico. Assim, com uma seleção cuidadosa dos materiais, as propriedades desejadas são adquiridas para o resultado final (Industrial, 2017).

Cerâmicas avançadas são tipos especiais de cerâmica utilizados principalmente para aplicações elétricas, eletrônicas, ópticas e magnéticas. Técnicas avançadas de produção são empregadas para garantir que os pós de cerâmica produzidos tenham pureza suficiente.

O material cerâmico pode ser usado em atividade artística (em que os artefatos são produzidos com valor estético) ou em atividade industrial (em que artefatos são produzidos para uso em construção e engenharia). Devido à sua plasticidade quando úmida e extrema dureza quando cozida a mais de 800°C, a argila é amplamente utilizada na cerâmica para produzir vários artefatos que variam de tijolos a semicondutores usados em computadores (Silva, 2009).

2.3 Produção de tijolos cerâmicos

Para trabalhar com tijolos cerâmicos faz-se necessário, antes de mais nada, o entendimento do seu processo de fabricação. Silva (2009) relata que o processo produtivo de cerâmica vermelha ainda é pouco evoluído em relação a outros seguimentos da indústria cerâmica, mas que inovações tecnológicas adotadas por algumas empresas vêm ajudando a aumentar a produção e a qualidade de seus produtos. A cadeia produtiva de tijolos abordada por Silva (2009) é esquematizada na Figura 2.6 e descrita a seguir.

a) Extração e preparação da matéria prima

A produção de tijolos cerâmicos é iniciada com a extração da matéria-prima: a argila. Para isto utiliza-se retroescavadeira e, geralmente, a fonte da matéria prima encontra-se próxima à empresa.

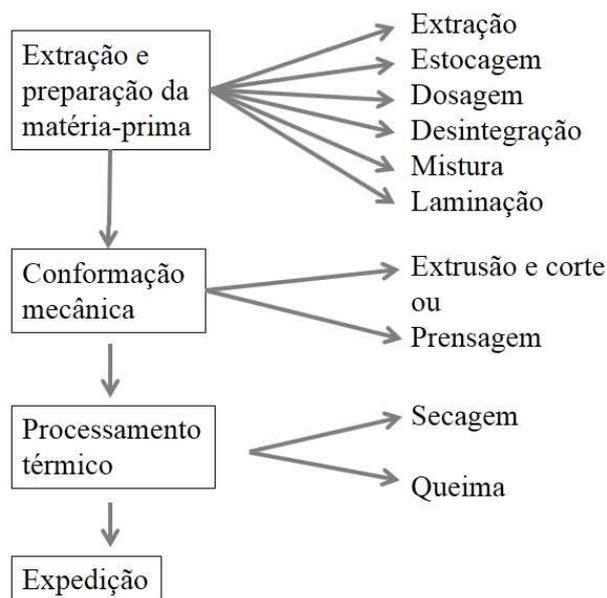


Figura 2.6: Cadeia produtiva do tijolo cerâmico.

Na fase da estocagem, conhecida como “descanso” ou “sazonamento”, o material sofre alterações químicas e descompactação, trazendo benefícios ao processo produtivo e garantindo produção nas épocas chuvosas. Quando é necessário usar duas ou mais argilas no processo produtivo, faz-se a pré-mistura, que pode ser realizada manualmente ou por pás carregadeiras, conforme o percentual de cada matéria-prima utilizada, obtendo-se uma massa única e homogênea.

Na etapa da dosagem, a argila é levada ao caixão alimentador dosador para ser dosada. Se as argilas forem muito duras e compactadas, passam por um desintegrador para diminuir a granulometria, de modo a facilitar as operações posteriores.

Na fase da mistura, a matéria-prima segue para o misturador, equipamento que realiza movimentos circulares, para homogeneizar a massa. Na homogeneização, a água é adicionada à argila para dar características de plasticidade e facilitar a moldagem das peças (Silva, 2016). A umidade é elevada geralmente de 18 à 30% (Silva, 2009).

b) Conformação mecânica

A conformação mecânica consiste em obter produtos com formas e dimensões específicas a partir de uma massa plástica de argila. Existem diversos processos para dar forma às peças cerâmicas, e a seleção de um deles depende fundamentalmente de fatores econômicos, da geometria e das características do produto. Os métodos mais utilizados compreendem: colagem, prensagem, extrusão e torneamento (Abceram, 2019).

A extrusão é feita em um equipamento chamado extrusora, o qual dá o formato ao produto (Figura 2.7). Nele, a massa é impulsionada por meio de um propulsor (conhecido como parafuso sem fim), através de uma chapa de aço perfurada, lançando-a dentro de uma câmara de vácuo. Pela câmara de vácuo retira-se o ar e o material é extraído por outro parafuso sem fim, conformando a massa no formato desejado. Ao sair da extrusora, o material contínuo é cortado nos tamanhos e forma padronizados.

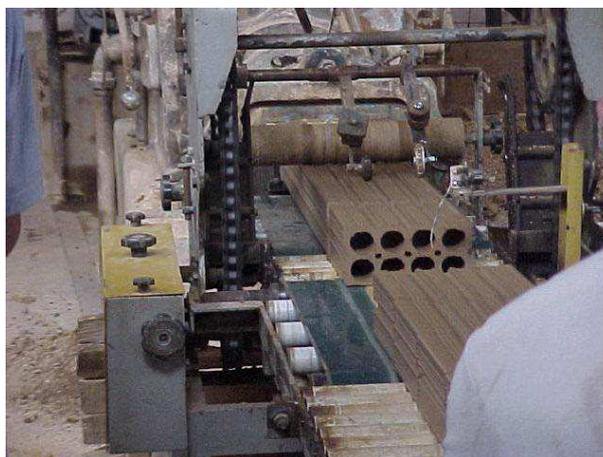


Figura 2.7: Processo de extrusão de tijolos.
Fonte: Kawaguti (2004).

A prensagem é uma alternativa à extrusão e tem por finalidade conformar a peça, dando-lhe resistência mecânica suficiente para suportar as diversas solicitações ao longo do processo produtivo, além de proporcionar peças uniformes, de acordo com as dimensões e a geometria pré-estabelecidas. Silva (2009) relata que a técnica permite que o produto final apresente as características microestruturais desejadas (porosidade, distribuição de tamanho de poros, tamanho de partículas, etc.), que irão determinar as características técnicas da peça (resistência mecânica, absorção de água, etc.). A prensagem é bastante utilizada na produção de tijolos ecológicos.

c) Processamento térmico

O processamento térmico consiste nas operações de secagem e queima das peças já preparadas e conformadas. Nesta etapa ocorrem as perdas de umidade e as transformações de estrutura e composição, responsáveis pela obtenção de propriedades finais, como brilho, cor, porosidade, resistência à flexão, ao gretamento e às altas temperaturas, ao ataque de agente químico, entre outras (Pauletti, 2001).

O processo de desumidificação de tijolos cerâmico pode ocorrer de modo natural ou de maneira artificial. Quando a operação de secagem do produto cerâmico é natural, os tijolos são empilhados em galpões cobertos (Figura 2.8), dispostos em prateleiras (fixas ou móveis) ou simplesmente empilhados no chão, e a duração da secagem depende da temperatura e umidade relativa do ar e da ventilação do local, necessitando de períodos de até seis semanas.



Figura 2.8: Galpão de secagem de tijolos cerâmicos.
Fonte: DG, 2018.

Para reduzir o tempo de secagem, a secagem artificial é realizada em câmaras ou fornos de secagem, utilizando, em regra geral, o calor residual dos fornos, enquanto estes estão a ser arrefecidos. O período de secagem artificial depende das características da matéria-prima, da forma das peças a secar, do tipo de secador e pode levar de 12 a 40 horas. A secagem artificial é realizada normalmente em uma temperatura entre 80 e 110 °C, e com umidade relativa muito elevada. Segundo Almeida *et al.* (2013), os tipos mais comuns de secadores artificiais são estáticos, contínuos ou semicontínuos.

Batista *et al.* (2009) relatam que durante a secagem, que acontece geralmente em estufas, ocorre a aproximação das partículas de argila e dos demais componentes, causando a retração volumétrica, ou seja, a redução do tamanho da peça, que pode variar de 4 a 10%, dependendo da umidade inicial do material. No processo, a água deve ser retirada cuidadosamente da argila, de forma lenta e gradual, para que a retração ocorra de maneira uniforme e simétrica, reduzindo os possíveis danos que pode surgir na etapa seguinte, a queima.

A queima do material cerâmico pode durar até vários dias e ocorre em fornos que alcançam uma temperatura variando entre 750 e 900°C (Figura 2.9). Neste processo, o calor

provoca transformações físico-químicas na massa argilosa, modificando as características de cru em propriedades cerâmicas, havendo o desenvolvimento de novas fases cristalinas e soldagem dos grãos. Características como resistência mecânica, contração linear, absorção e porosidade dependem tanto do processo de secagem quanto da boa operação do forno.



Figura 2.9: Forno túnel para queima de telhas e tijolos.
Fonte: ICEMEG, 2018.

d) Expedição

A expedição é a fase final do processo produtivo e, segundo Silva (2009), pode ser subdividida nas etapas:

- Inspeção: é feita na saída do forno, rejeitando material quebrado, trincado, lascado ou queimado em excesso;
- Armazenamento: é feito em área coberta, permanecendo no local até o carregamento para expedição;
- Entrega ao cliente: efetuada através de caminhões por via rodoviária.

2.4 Secagem de materiais

A secagem é definida como a operação unitária destinada à remoção de um líquido agregado a um sólido para uma fase gasosa insaturada, pela vaporização térmica. A secagem possui uma distinção natural em termos de escala (Figura 2.10). Defraeye (2014) classifica as escalas de secagem em:

- Escala de secador (10^{-1} a 10^3 m): os componentes do material a ser secado não podem ser distinguidos, como por exemplo o cimento e agregados no concreto.
- Macroescala (10^{-2} a 10^{-1} m): são distinguidos os componentes do material e rachaduras.

- Mesoescala (10^{-4} a 10^{-2} m): para cada componente do material pode-se distinguir características como macroporos, interfaces e gotas na superfície. Cada componente possui uma aparência homogênea.
- Microescala (10^{-6} a 10^{-4} m): partes menores de um componente podem ser diferenciadas, como microporos, microcapilares, microcristais e fendas em madeira.
- Nanoescala (10^{-6} a 10^{-9} m): como exemplos de materiais analisados em nanoescala citam-se nanocapilares, paredes celular e microfibras de celulose.

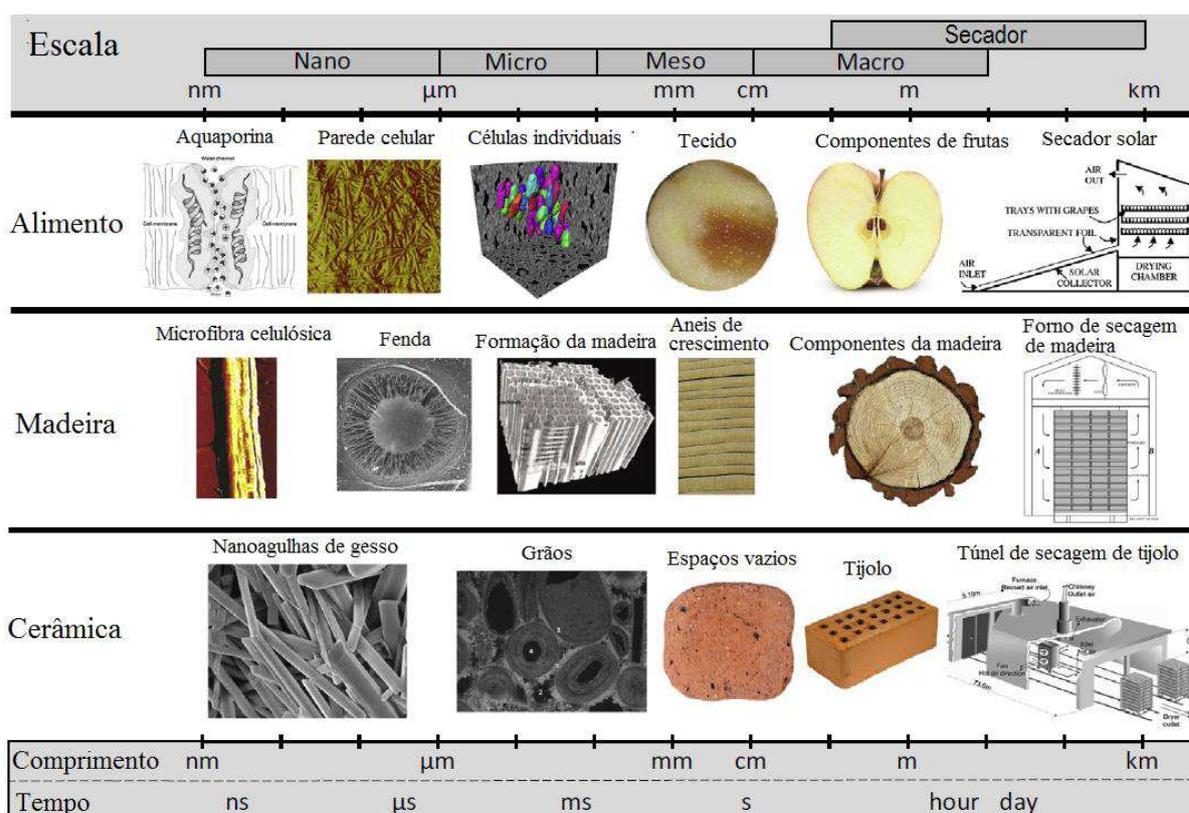


Figura 2.10: Escalas naturais de alguns produtos importantes na indústria de secagem.

Fonte: Adaptado de Defraeye (2014).

Avhad e Marchetti (2016) acreditam que o equipamento de secagem deve ser projetado considerando os seguintes critérios:

- O secador deve fornecer calor suficiente para a evaporação da umidade das amostras;
- Um ar apropriado deve ser fornecido para eliminar a umidade no secador;
- As condições circundantes não devem diminuir a qualidade do produto;
- Tempo necessário para uma secagem satisfatória do material.

O processo de secagem envolve diversos fenômenos físicos, os quais são responsáveis pelas mudanças de fase, e devem ser compreendidos pelo engenheiro projetista

para determinar as condições de operação adequadas. Fenômenos como a transferência de calor, massa e momentum ocorrem dentro e fora do material (Figura 2.11). A transferência de calor do meio externo para a amostra pode ocorrer por convecção, radiação (solar e infravermelho) e por condução (via contato com o sólido), podendo causar a mudança de fase (calor latente de vaporização). A transferência de massa se dá por difusão, por ação capilar ou por mudança de fase (evaporação). As partículas de água se desprendem da superfície do sólido e se move para o ar via convecção. Por envolver os referidos fenômenos, diversas mudanças no material ocorrem durante seu processo de secagem, as quais podem ser físicas, químicas e/ou biológicas, a depender do material em estudo.

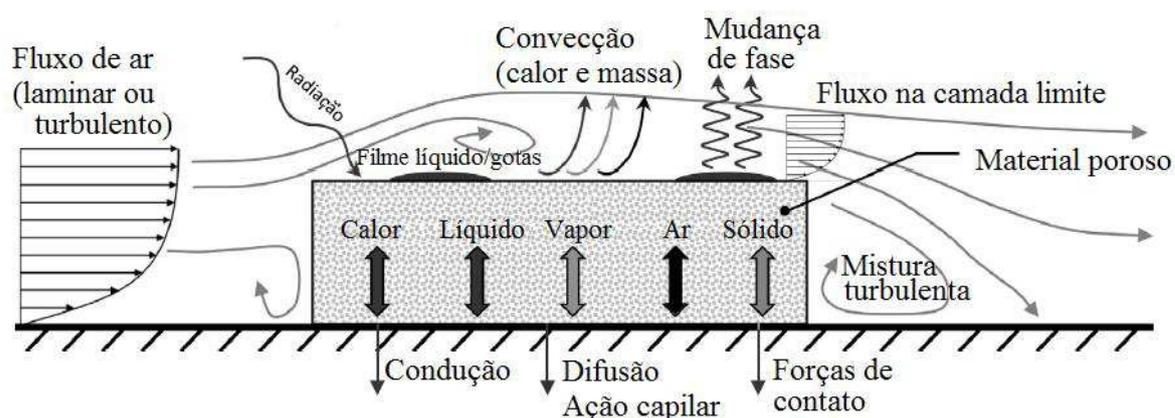


Figura 2.11: Processos de troca na secagem de materiais.
Fonte: Adaptado de Defraeye (2014).

Assim, o desenvolvimento do modelo matemático para o processo de secagem é crucial, pois permite aos engenheiros de projeto não apenas escolher as condições de operação mais adequadas necessárias para a secagem efetiva, mas também dimensionar o equipamento de secagem de acordo com os parâmetros de operação desejados.

2.4.1 Comportamento geral na secagem

Os conceitos a seguir são a base para entender o comportamento do processo de secagem, isto é, retirada de umidade de um material, e como ele é influenciado pelas características psicrométricas do ar que o circunda, no caso de uma secagem convectiva.

O ar úmido é uma mistura de ar seco (componente puro) e vapor de água. Temperatura de saturação (T^{sat}) é definida como a temperatura na qual determinada substância pura se vaporiza em uma determinada pressão do sistema (P). A pressão que o vapor de água exerce no ar é chamada de pressão de vapor (P_{vapor}). Para cada temperatura de

saturação, o ar seco consegue absorver uma quantidade limite de vapor de água sem liquefazê-lo, e nesse valor limite, o vapor exerce no ar o que é conhecido por pressão de vapor no ponto de saturação (P_{vapor}^{sat}).

A razão de mistura (ω), ou umidade específica, é uma propriedade que mede o quanto de massa de vapor de água (m_{vapor}) está presente em uma determinada massa de ar seco ($m_{ar\ seco}$), conforme Equação 2.1.

$$\omega = \frac{m_{vapor}}{m_{ar\ seco}} \quad (2.1)$$

Considerando tanto o vapor de água como o ar seco como gases ideais, a razão entre a massa de vapor e a massa de ar seco pode ser substituída pela razão entre a massa molar do vapor (MM_{vapor}) multiplicada pela pressão do vapor (P_{vapor}) e a massa molar do ar ($MM_{ar\ seco}$) multiplicada pela pressão do ar seco ($P_{ar\ seco}$), conforme Equação 2.2.

$$\omega = \frac{MM_{vapor} P_{vapor}}{MM_{ar\ seco} P_{ar\ seco}} = \frac{18 P_{vapor}}{28,97 P_{ar\ seco}} = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P_{ar\ seco}} \quad (2.2)$$

Considerando o modelo de Dalton, a pressão de um sistema é igual ao somatório das pressões parciais de cada componente no sistema. Assim, a razão de mistura é reescrita como segue:

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} \quad (2.3)$$

A umidade relativa é uma grandeza adimensional definida como razão entre a pressão parcial de vapor em um meio pela pressão parcial de vapor no ponto de saturação. Matematicamente, a umidade relativa (U_{Rel}) é definida por:

$$U_{Rel} (\%) = \frac{P_{vapor}}{P_{vapor}^{sat}} \times 100\% \quad (2.4)$$

O termo secagem é aplicado à transferência de um líquido que está num sólido úmido para uma fase gasosa não saturada, isto é, para um ar cuja pressão parcial de vapor no

ar esteja menor que a pressão de vapor no ponto de saturação. Em caso contrário, quando a pressão de vapor no ar se encontrar no valor de saturação, a transferência do líquido de um sólido para o ar não ocorrerá. A umidade relativa mede, portanto, a capacidade do ar em absorver o líquido que sai de um material sólido, sendo uma variável que controla o processo de retirada de líquido (Moran *et al.*, 2015).

A umidade de um material pode ser definida em base seca ou em base úmida. O termo teor de umidade em base seca de um material, ou simplesmente teor de umidade (M), representa a razão da massa de líquido (em geral, água) que um material contém pela massa seca daquele material (Equação 2.5), e comporta-se como uma curva decrescente ao longo do processo de secagem, como ilustra a Figura 2.12.

$$M = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa seca do material}} \quad (2.5)$$

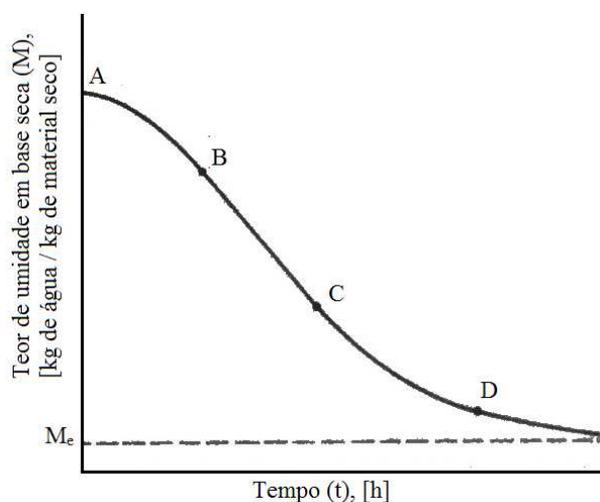


Figura 2.12: Curva genérica do teor de umidade em processos de secagem de materiais.

Fonte: Adaptado de Foust *et al.* (1982).

A taxa de secagem (M'), ou seja, a velocidade com que o material é secado diminui com o decréscimo do teor de umidade, isto é, ao longo da secagem a perda de umidade vai se tornando mais lenta. Este comportamento é descrito pela Figura 2.13, a partir da qual podem ser feitas as observações seguintes sobre a taxa de secagem:

- No segmento AB: a taxa de secagem pode ser crescente ou decrescente. A superfície do sólido está totalmente molhada, justificando o fato da temperatura da superfície ser igual à temperatura de bulbo úmido do meio secante.
- No segmento BC: a taxa de secagem passa a ser constante e toda a superfície do sólido permanece saturada de água. A temperatura da superfície continua sendo a

temperatura de bulbo úmido. A taxa de difusão de vapor de água através do filme estacionário de ar ao redor do material cresce com a velocidade do ar, devido à elevação do coeficiente de transferência de calor por convecção, e diminui com o aumento da espessura do filme de ar em torno do material. Fortes e Okos (1980) afirmam que a magnitude do período de taxa constante depende dos coeficientes de transferência de calor e massa, da área exposta no meio de secagem, da geometria e das diferenças de temperatura e umidade entre a corrente gasosa e a superfície molhada do sólido.

- No segmento CD: a secagem entra no primeiro período de taxa decrescente. A velocidade do movimento do líquido no interior do sólido para a superfície é menor do que a velocidade da superfície para o meio externo. As primeiras bolsas de ar começam a se formar, ocupando a região que pertenceu à umidade.
- No ponto D: a superfície não está mais saturada.
- No segmento DE: a secagem entra no segundo período de taxa decrescente. Toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido. A pressão de vapor de água na superfície do material diminui até o momento em que se iguala à pressão de vapor no gás secante afluyente, atingindo a umidade de equilíbrio (M_e), onde o montante de água que evapora é igual ao montante que condensa.

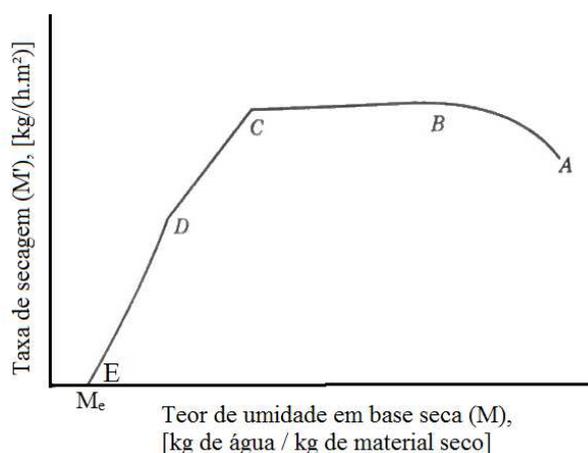


Figura 2.13: Taxa de secagem em função do teor de umidade em processos de secagem de materiais.

Fonte: Adaptado de Foust *et al.* (1982).

Os tipos de umidade envolvidos na secagem de sólidos são apresentados na Figura 2.14, onde o ponto D caracteriza o teor de umidade crítico, o qual está localizado no final do período à taxa constante. Neste ponto, o movimento do fluido no interior do sólido não é suficiente para substituir o líquido que está evaporando na superfície. Tal teor depende da

estrutura do sólido, da espessura da amostra e da velocidade da secagem, mas depende muito pouco da taxa de secagem.

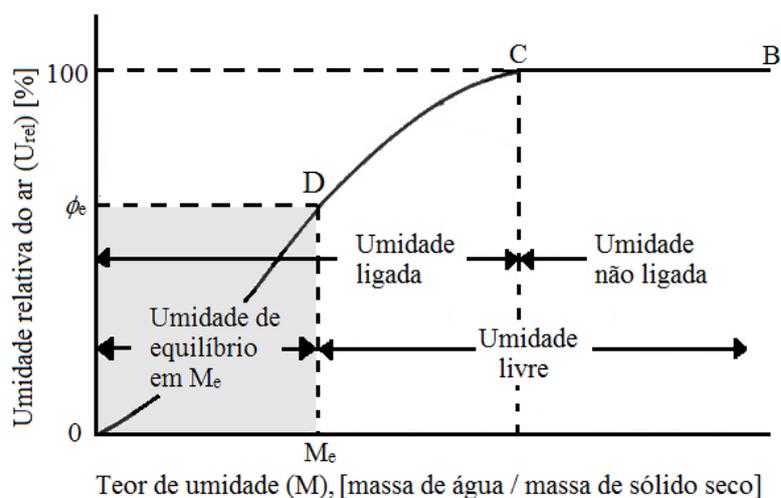


Figura 2.14: Tipos de umidade envolvidos na secagem de sólidos.
Fonte: Adaptado de Foust *et al.* (1982).

Umidade de equilíbrio é a umidade retida em um sólido, em equilíbrio com o gás úmido, e que não pode ser removida pelo ar secante. Ela depende da estrutura do sólido, da temperatura e da umidade do ar. A umidade livre é a umidade retida em excesso no sólido e além do teor de umidade de equilíbrio.

Umidade não ligada é a umidade extra que atua como uma água não ligada, sendo aquela que fica na superfície do sólido, como um filme líquido. A umidade ligada é aquela retida no sólido em equilíbrio com o ar parcialmente saturado, ou seja, ar com uma umidade relativa abaixo de 100%.

2.4.2 Teoria da difusão líquida

Um dos mecanismos mais conhecidos para descrever os fenômenos físicos ocorrentes durante o período de taxa decrescente no processo de secagem é o da difusão, que é característico de materiais de secagem lenta, ocorrendo mais frequentemente em materiais não porosos. McCabe *et al.* (1993), explicam que a resistência à transferência de massa do vapor de água do sólido para o ar é normalmente desprezível, e a difusão no sólido controla a taxa de secagem global. O teor de umidade no material possui o maior valor no início do processo de secagem e este valor decresce no decorrer do processo, atingindo um valor de equilíbrio nos instantes finais. Ao adotar condições de contorno de primeira espécie no

modelo da difusão, o teor de umidade na superfície do material sólido permanecerá com valor igual ou próximo ao teor de equilíbrio ao longo de toda a secagem. A temperatura do ar tem influência direta na secagem, pois um aumento da temperatura, por exemplo, causa a elevação da pressão de vapor no ar e a umidade de equilíbrio é modificada. Com relação ao sólido, o aumento de sua temperatura faz com que a difusividade da umidade seja aumentada.

Muitos pesquisadores utilizam a teoria da difusão líquida, conhecida como segunda lei de Fick, para descrever o processo de remoção de umidade e determinar o coeficiente de difusão efetivo (Correa *et al.*, 2010). Nessa teoria, a difusão da umidade é geralmente controlada pela transferência de massa interna (Chen *et al.*, 2012), sendo dada por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.6)$$

onde D é o coeficiente de difusão do líquido e M o teor de umidade do sólido.

Acerca do mecanismo de difusão líquida, a diferença de concentração de umidade é a força motriz da transferência de umidade. O modelo da difusão líquida tem sido largamente aplicado na secagem de produtos alimentícios, como alho (Younis *et al.*, 2018), arroz (Passos *et al.*, 1989; Basunia e Abe, 2000; Cihan *et al.*, 2008; Hacıhafizoglu *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2015; Franco *et al.*, 2016; Xing-jun *et al.*, 2016.), azeitona (Cruz *et al.*, 2015; Koukouch *et al.*, 2017.), banana (Lima *et al.*, 2002; Silva, C. *et al.*, 2012; Farias *et al.*, 2016), batata (McLaughlin e Magee, 1999; Islam *et al.*, 2003; Jia *et al.*, 2003; Rahman *et al.*, 2007; Ateeque *et al.*, 2014), café (Corrêa *et al.*, 2010.), cenoura (Jia *et al.*, 2003; Barati e Esfahani, 2011; Haq *et al.*, 2016), feijão (Corrêa *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2008; Almeida *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2009), lentilha (Carmo e Lima, 2005; Carmo *et al.*, 2012.), marmelo (Tzempelikos *et al.*, 2015.) e trigo (Gong *et al.*, 1997.; Santos *et al.*, 2015.).

A teoria da difusão líquida também é amplamente utilizada na secagem de materiais de origem vegetal, como na secagem de biomassa de serragem de madeira (Chen *et al.*, 2012) e dessa mesma serragem adicionada de casca de arroz e palha de milho (Chen *et al.*, 2013), na secagem de fibras de cana de açúcar (Rodriguez-Ramirez *et al.*, 2000.), de folhas de aroeira (Goneli *et al.*, 2014.) e de tecidos porosos fibrosos (Zhu e Li, 2003).

Em se tratando de secagem de materiais para a indústria de cerâmica, observa-se a aplicação da difusão líquida na secagem de argila (van der Zanden *et al.*, 1996; Augier *et al.*, 2002.; Silva *et al.*, 2013), de telha cerâmica (Silva, W. *et al.*, 2012) e de tijolos cerâmicos

(Tomas *et al.*, 1994; van der Zanden, 1996.; Nascimento *et al.*, 2004.; Cadé *et al.*, 2005.; Silva *et al.*, 2011.; Silva *et al.*, 2013; Brito *et al.*, 2016.; Araújo *et al.*, 2017.; Araújo *et al.*, 2018; Araújo *et al.*, 2019).

2.5 Pesquisas publicadas na área de secagem de materiais cerâmicos

2.5.1 Estudos experimentais

Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo principal de colher dados para a melhoria do processo de secagem de materiais cerâmicos. Sejam experimentais ou numéricos, alguns buscam a obtenção de dados do material, como coeficiente de difusão de umidade, porosidade, permeabilidade, etc. Outros trabalham visam estudar a cinética de secagem do material (Cadé *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2011; Silva, J. *et al.*, 2012; Almeida *et al.*, 2013; Tavares *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2016;) e há os que buscam compreender os defeitos causados por uma secagem de má qualidade, como trincas e rachaduras que surgem na queima do material (Batista *et al.*, 2008; Batista *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2011; Khalili *et al.*, 2014; Nascimento *et al.*, 2015).

Na secagem experimental de um sólido cerâmico poroso realizado por Belhamri (2003) com controle de temperatura, umidade e velocidade do ar, a amostra é pesada continuamente por uma balança eletrônica (precisão 0,01g), a temperatura da superfície é obtida pelo sensor de radiação infravermelha, enquanto a saturação da superfície é obtida pelo analisador fotométrico de infravermelho próximo, com precisão igual a 0,005%. Verificou-se que após um curto período transitório, o material apresenta uma longa taxa de secagem constante. Durante esse período, a temperatura da superfície permanece constante e seu valor é ligeiramente menor que a temperatura do bulbo úmido. No segundo período a taxa de secagem passa a ser decrescente, conforme exhibe a Figura 2.15.

Almeida *et al.* (2013) estudaram a redução lenta e uniformemente do teor de umidade de tijolos cerâmicos de 20 a 25%, após extrusão ou prensagem, para 3 a 10% no final da secagem. Para isto, estudou-se a secagem de tijolos cerâmicos dispostos em carrinhos em um secador industrial do tipo túnel de fluxo cruzado. A simulação numérica da transferência de calor e massa foi realizada usando o método dos volumes finitos (*software Mathematica*[®]), cujo domínio computacional e condições de contorno de circulação do ar são apresentadas na Figura 2.16. Afirmou-se que o calor transferido por convecção do ar

para o produto é utilizado para aquecer o tijolo, aquecer a umidade do material que está na fase líquida, vaporizar a umidade e aquecer o vapor produzido.

Os autores concluíram que houve uma boa aproximação entre os resultados numéricos e experimentais. Observou-se que os gradientes de umidade absoluta e temperatura do ar e os gradientes de teor de umidade e temperatura do produto ocorrem na direção de fluxo de ar.

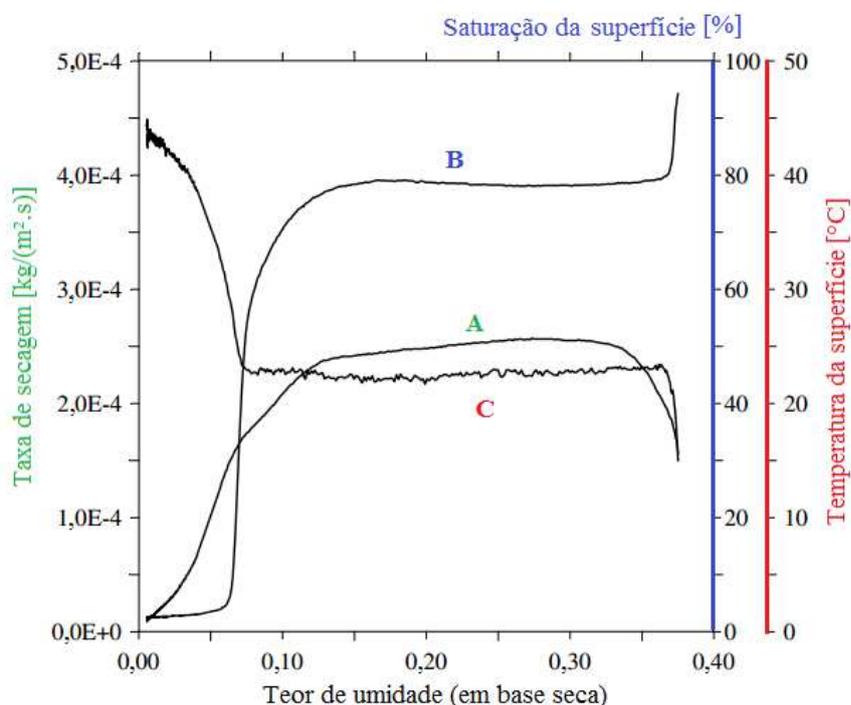


Figura 2.15: Secagem de tijolo poroso ($T_F = 50^\circ\text{C}$, $U_{rel} = 14\%$ e $\vec{U} = 3\text{m/s}$): (A) Taxa de secagem, (B) saturação da superfície e (C) temperatura da superfície.

Fonte: Adaptado de Belhamri (2003).

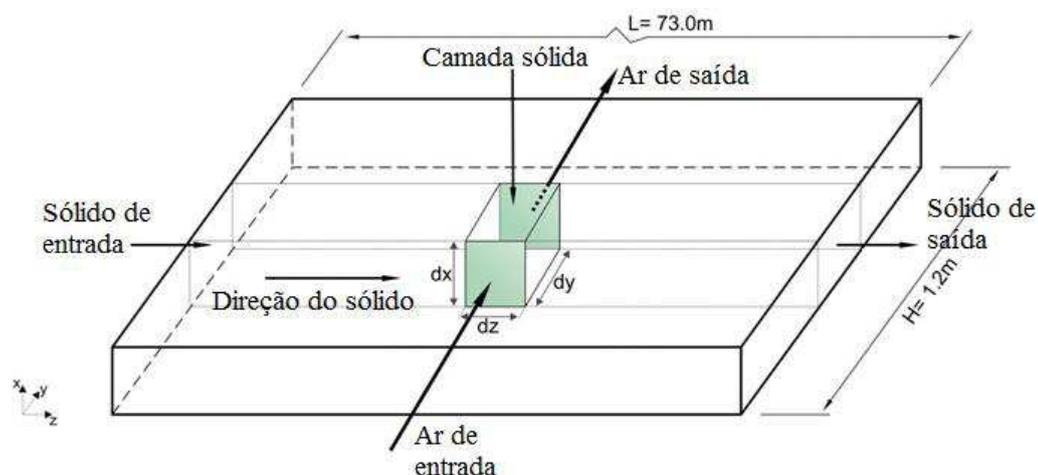


Figura 2.16: Condições de contorno do secador industrial de fluxo cruzado.

Fonte: Adaptado de Almeida *et al.*, 2013.

Koronthalyova e Bagel (2015) estudaram o efeito da contaminação com sal nos parâmetros de transporte de umidade (permeabilidade do vapor de água) e na difusividade da umidade em tijolos cerâmicos. Os tijolos foram mergulhados em água destilada e em soluções salinas a 4% e a 6% (40 ou 60 g de NaCl em 1000 g de água destilada). As quatro superfícies laterais das amostras foram seladas com resina epóxi para garantir o fluxo de umidade unidimensional. Os resultados mostraram que para as baixas concentrações de sal o processo de captação capilar é praticamente idêntico para os tijolos imersos em solução salina e o imerso em água destilada. O processo de secagem é significativamente afetado pela criação real da crosta de sal. Para as concentrações de sal testadas, o vapor de água e o transporte de água capilar dentro do tijolo foram apenas levemente afetados pela presença de sal. A redução da permeabilidade ao vapor de água pode ser totalmente explicada pela presença de crosta de sal formada na superfície da amostra.

Khan e Straatman (2016) abordaram a secagem convectiva de materiais porosos. Esses materiais são compostos por uma estrutura sólida, água e espaços vazios, e podem ser classificados de acordo com a sua natureza higroscópica. Como materiais higroscópicos podem-se citar o tomate, a cenoura e a madeira, e como materiais não higroscópicos a areia e a cerâmica. Na secagem convectiva de materiais porosos, o ar com baixa umidade relativa é forçado a atravessar meios porosos úmidos, e o transporte da umidade ocorre na forma de vapor de água e na forma de água líquida.

Para investigar os mecanismos de secagem em diferentes estágios, Oummadi *et al.* (2019) examinaram a distribuição da água dentro dos corpos cerâmicos em diferentes escalas. As medições experimentais, usando uma técnica de pesagem simples e a Ressonância Magnética, mostram que durante o primeiro estágio de secagem envolvendo o encolhimento, o material é constituído por sólidos e água sem gradiente do teor de água na amostra. Durante o segundo estágio de secagem, diferenças significativas no teor de água em função da posição aparecem. Como complemento, na escala de grãos foram feitas observações usando microscopia eletrônica de varredura ambiental, fornecendo informações úteis sobre as interfaces sólido-líquido-gás na parte próxima da superfície do corpo. Finalmente, a partir da distribuição da água foi feita uma estimativa simples do coeficiente de difusão da água com sua dependência do teor de umidade. No progresso da secagem observou-se que a diminuição do teor de umidade ocasionou a queda no valor da difusividade mássica.

Vorhauer *et al.* (2019) estudaram um processo alternativo para a secagem conservativa de argila úmida com base no processo combinado de aquecimento no micro-

ondas e secagem por convecção. Foi feita uma análise experimental dos processos que controlam a secagem de matéria porosa na presença de gradientes de temperatura. Afirma-se que o controle do processo não pode ser confiável com base apenas na transferência de calor, pois a cinética de secagem é determinada pela associação entre o aquecimento por micro-ondas e os fenômenos de transferência de massa. Se o aquecimento do micro-ondas (dielétrico) não for controlado ou ocorrer com alta potência (800 W), pode acontecer da transferência de massa ser dominada pelo acúmulo de pressão no interior do material e ocorrer a expulsão brusca do líquido (Figura 2.18), causando a deterioração da argila. Propõe-se o aquecimento intermitente por micro-ondas em combinação com períodos de secagem convectivos, para reduzir o tempo total de secagem (em comparação com a secagem convencional por convecção), e para melhorar a qualidade do produto através da redução do encolhimento do material (Figura 2.19). As experiências de secagem indicam que a redução geral do tempo de secagem e a qualidade do produto dependem da frequência e duração dos dois períodos subsequentes de aquecimento intermitente e secagem por convecção. Na secagem convencional apareceu na amostra duas regiões: uma bastante seca e outra com grande umidade. Diferentemente da secagem com aquecimento dielétrico, onde a distribuição de umidade na amostra comportou-se de modo uniforme.



Figura 2.17: Amostra cilíndrica deteriorada de altura 49 mm e diâmetro 33 mm.
Fonte: Vorhauer *et al.* (2019).



Figura 2.18: Distribuição interna de umidade em uma amostra seca com aquecimento controlado por micro-ondas em 122 min de secagem.
Fonte: Vorhauer *et al.* (2019).

2.5.2 Simulação numérica

Diversos métodos computacionais avançados aplicados à secagem de materiais porosos emergiram claramente na última década (Figura 2.20), e dentre eles destaca-se a fluidodinâmica computacional (CFD). É um método de modelagem avançada bastante

conhecido e difundido, sendo aplicado para secadores convectivos, secadores por pulverização, secadores de bandejas, secadores de flash e secadores de leito fluidizado, por exemplo. Defraeye (2014) realizou uma pesquisa sobre uso de CFD em tecnologia de secagem, considerando publicações de periódicos relevantes sobre CFD de 2008 até 2013, e identificou que na época a simulação numérica tinha pouca representatividade no montante de artigos publicados sobre secagem.

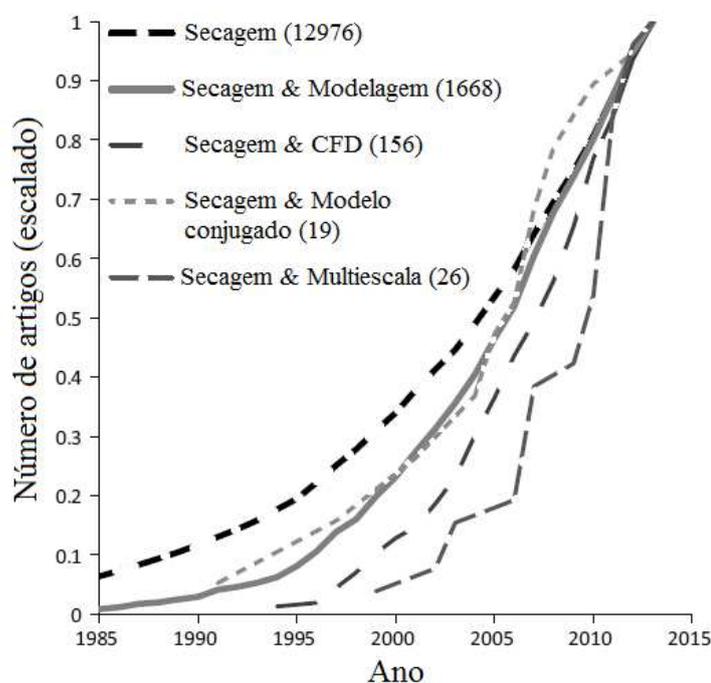


Figura 2.19: Número de artigos sobre tecnologia de secagem e sua relação com métodos computacionais avançados, obtidos a partir da Scopus, em função do tempo.

Fonte: Adaptado de Defraeye (2014).

Em geral, o escoamento externo de fluido, o qual acontece quando o ar circula o material sólido que se deseja secar, gera vórtices, ou seja, ocorre turbulência. A turbulência é caracterizada por um escoamento de fluido com intensa agitação caótica e imprevisível. Osborne Reynolds (1842-1912) sugeriu que os campos presentes nas equações de Navier Stokes fossem divididos em componentes médias e componentes flutuantes, ou turbulentas. Esse procedimento revelou novas variáveis dinâmicas, resultando em um número de variáveis dinâmicas independentes maior do que o número de equações governantes disponíveis e caracterizando um problema matematicamente indeterminado. Necessita-se então de modelos de fechamento para a solução do problema, conhecidos como modelos de turbulência (Araújo, 2014).

Softwares comerciais são muito usados para análise de problemas físicos, particularmente ANSYS Fluent e ANSYS CFX. Com relação à escolha do modelo de

turbulência, a abordagem das Equações médias de Navier-Stokes (RANS) domina, principalmente em combinação com modelos de turbulência de duas equações (modelos $\kappa-\varepsilon$ e $\kappa-\omega$) e funções de parede. Como nenhum modelo de turbulência é universalmente válido, deve-se escolher um modelo para cada caso baseando-se em estudos experimentais e de validação. A pesquisa de Defraeye (2014) também revelou que a modelagem 2D ainda é amplamente utilizada junto à modelagem 3D (cerca de 50/50). O mesmo vale para a modelagem em estado estacionário e transiente (também cerca de 50/50) na época.

Em secagem, a CFD é uma das ferramentas mais apropriadas para elevar o conhecimento sobre o fluxo de fluido, assim como os campos de temperatura e umidade nos sistemas de secagem. Esse conhecimento é aplicado no projeto e na otimização de equipamentos de secagem e em estratégias de processamento.

A simulação numérica tem sido aplicada extensivamente para modelar a secagem de partículas úmidas (material granular) ou gotículas com material sólido dentro (suspensão ou dissolvido). Segundo Defraeye (2014), a CFD é usada para obter os fluxos das partículas e trajetórias, tempo de secagem de partículas, tempo de residência, locais de deposição de partículas e a influência das condições de secagem e design da câmara no processo de secagem de partículas. A CFD oferece uma alternativa aos estudos experimentais de laboratório, de planta piloto ou em larga escala, e tem a vantagem particular de que o fluxo de partículas (individual) e o comportamento de secagem podem ser monitorados com uma resolução espacial muito elevada.

Boukadida e Nasrallah (2002) afirmam que para preservar a qualidade do produto e reduzir o tempo de secagem com um consumo de energia mínimo na fabricação de tijolos cerâmicos, é necessário idealizar o processo de secagem. Para reduzir o tempo de secagem, precisa-se simultaneamente melhorar a circulação da água e a difusão de gás e acelerar a evaporação da superfície. A secagem por convecção em condições específicas permite, em casos particulares, a redução do tempo de secagem e a preservação da qualidade dos produtos ao mesmo tempo. Os autores realizaram uma investigação numérica para estudar a transferência bidimensional de calor e massa durante a secagem por convecção de um tijolo de argila. O sistema trata-se de uma placa porosa plana composta por uma fase sólida inerte e rígida, por uma fase líquida (água pura) e por uma fase gasosa que contém vapor de ar e de água. A placa é exposta a uma mistura ar-vapor com características fixas (velocidade, temperatura e massa de água). Inicialmente, o meio poroso é isotérmico e está em equilíbrio hidrostático. Dado que a espessura da placa é pequena, o teor de umidade pode ser considerado constante em toda a placa. Os autores utilizam o termo “teor de umidade”, mas

no equacionamento utiliza-se massa de água. Os autores fizeram várias suposições simplificadoras para obter um conjunto fechado de equações macroscópicas aplicável (a placa é homogênea e isotrópica; o sólido-líquido-gás está em equilíbrio termodinâmico local; o trabalho mecânico e a dissipação viscosa são insignificantes; a fase gasosa é ideal no sentido termodinâmico; o termo dispersão e os termos de tortuosidade são interpretados como termos de difusão). As equações que governam a transferência de calor e massa na placa porosa plana são: lei de Darcy generalizada, equações de conservação da massa nos três estados de agregação, equação de conservação da energia e relações termodinâmicas das pressões parciais. O sistema de equações é resolvido pelo método das diferenças finitas. Após a análise dos resultados os autores concluíram que a magnitude da cinética de secagem tem maior relevância em condições de temperatura e pressão ambiente mais altas.

Silva (2009) tomou amostras de tijolos cerâmicos industriais vazados de oito furos provenientes da Indústria Cerâmica Cincera (Santa Rita-PB), realizou a análise mineralógica da argila constituinte dos tijolos e a secagem experimental das amostras. O autor afirma que o processo de difusão transiente de massa e calor em tijolos cerâmicos vazados pode ser descrito pela equação geral de difusão representando a Lei de Fick para difusão de massa e a Lei de Fourier para transferência de calor. Foram produzidas simulações numéricas em código aberto da secagem de tijolo cerâmico, que foram comparadas com os dados resultantes da secagem experimental. Para simular o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados, Silva (2009) utilizou uma malha cartesiana regular. O sistema de equações discretizadas pelo autor via métodos dos volumes finitos foi resolvido utilizando o *software* Mathematica[®]. A modelagem matemática mostrou-se adequada para prever o comportamento da curva de secagem do material cerâmico.

Shokouhmand *et al.* (2011) realizaram uma modelagem tridimensional de um secador de câmara usado na indústria de tijolos/cerâmica. Em uma segunda etapa obtiveram, a partir do resultado da modelagem 3D, os valores críticos para o coeficiente de transferência de calor. As equações que governam a secagem de um tijolo bidimensional como um sólido poroso são compostas pelas leis de conservação, lei de Fourier para condução de calor, leis de Darcy e Fick para difusão em massa em material poroso. O conjunto de equações diferenciais parciais de transporte de calor e massa em um único tijolo, juntamente com as respectivas condições de contorno de temperatura e umidade é resolvido numericamente com base no método das diferenças finitas. Finalmente, um esquema eficiente para os dispositivos de circulação de ar, temperatura e umidade relativa

do ar de entrada, características do queimador, vazões e controle do processo de secagem foi proposto para um típico secador de tijolos em escala industrial.

Van der Zanden e Wit (2012) propuseram um procedimento para medir o coeficiente de difusão da água no tijolo em função da concentração de água, baseado em um método para medir a massa de um tijolo de secagem nas duas extremidades externas. Neste método, o tijolo é submetido a secagem unidimensional. O procedimento foi testado usando uma simulação com valores de parâmetros realistas e imprecisões experimentais. Um experimento consistiu em 120s de secagem onde mediu-se as massas a cada 10s com uma precisão de 10^{-6} kg. A amostra foi desumidificada até um teor de água mais baixo e em seguida a secagem foi interrompida por algum tempo para permitir que o perfil de concentração se aproxime de um perfil de concentração de equilíbrio conhecido, após o qual outra medição foi realizada com o menor teor de água. O valor do coeficiente de difusão foi encontrado com a aplicação do erro relativo.

Khalili *et al.* (2014) afirmam que durante a secagem de produtos como tijolos de argila e telhas cerâmicas podem ocorrer encolhimento, gerando tensões induzidas e resultando em rachaduras e deformações. As tensões seguem uma tendência crescente ao longo da redução da umidade, e alcançam um valor máximo em um determinado tempo durante o processo de secagem, onde o gradiente de umidade é máximo, e então passam a ter uma tendência decrescente e eventualmente alcançam um estado estacionário em intervalos de tempo finais. As deformações ocorrem mais expressivamente nas quinas do tijolo.

Brito *et al.* (2016) desenvolveram um modelo matemático tridimensional transiente baseado nas leis de Fick e Fourier para prever o transporte de calor e massa em sólidos de forma paralelepípedo durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos comuns. Dados experimentais foram tomados como referência, tais como a temperatura do ar de secagem de 80°C , a umidade relativa do ar de 5%, velocidade do ar de 0,1m/s e o tempo total de simulação de 270 minutos. No *software* Wolfram Mathematica[®] foram inseridas propriedades físicas constantes tais como: condutividade térmica de $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, calor específico de $1673,51 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, massa específica de $1920 \text{ kg}/\text{m}^3$ e difusividade mássica de $1,296 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, e coeficiente de transferência de massa convectiva de $1,35 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ e o coeficiente de transferência de calor convectivo de $4,9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$. A solução analítica das equações governantes foi obtida usando o método de separação de variáveis. Os autores compararam os resultados previstos da cinética de secagem com os obtidos via simulação numérica e obtiveram um erro mínimo quadrado de $0,00846885 \text{ (kg/kg)}^2$. A partir dos campos de umidade e de temperatura plotados sobre planos no interior do sólido, os autores

concluíram que o fluxo de umidade ocorre do centro para a superfície do sólido e o fluxo de calor segue o caminho inverso ao fluxo de umidade. Concluíram também que os mais altos gradientes de temperatura e umidade ocorreram nos cantos do sólido. Portanto, essas regiões são mais suscetíveis à ocorrência de choques térmicos, trincas e deformações, que comprometem a qualidade do produto.

De acordo com Khan e Straatman (2016), a modelagem numérica de secagem convectiva é classificada em categorias baseadas no seu nível de sofisticação. As mais simples são modelos de curva de secagem, onde uma única equação de umidade é aplicada em materiais porosos para avaliar a perda de umidade como função da temperatura e de outros parâmetros. Tais modelos predizem a taxa de secagem global, mas não localmente. A próxima categoria de modelos utiliza equações diferenciais de transporte de energia e umidade para modelar o processo de secagem dentro do domínio poroso, e há a previsão das variações locais de temperatura e teor de umidade dentro do material de secagem. A terceira categoria melhora a avaliação do calor convectivo e da transferência de massa dentro do domínio poroso. Sua diferença principal é o fato de considerar a região fluida que envolve o material, embora não de forma conjugada direta. A maioria dos trabalhos na literatura utilizam a primeira categoria para descrever a secagem de materiais porosos, conseguindo fornecer a variação média da temperatura e da umidade com o tempo. Porém, esta abordagem não prediz os gradientes de temperatura e de umidade localmente.

O principal objetivo do trabalho de Khan e Straatman (2016) é demonstrar a capacidade de propor uma formulação para uma simulação precisa de processo de secagem convectiva de materiais porosos. Foi simulada a secagem de um pedaço de maçã sem casca a partir de um domínio poroso com malha hexaédrica. Foram resolvidas, a partir do método dos volumes finitos, as equações da conservação da massa, momentum e energia, além da equação de transporte de umidade, em ambos os domínios. O ar, na região de fluido, foi tratado como uma mistura de ar seco e vapor de água. Os autores consideraram o transporte de água líquida e de vapor de água dentro do material. Para validar a modelagem matemática adotada, os autores obtiveram os dados numéricos da curva de secagem adimensional, que é dada pela relação entre umidade em base seca a cada instante (M) e a umidade em base seca inicial (M_0), para o ar com uma umidade relativa de 9% e uma temperatura de 60°C, e compararam com os dados experimentais de Velic *et al.* (2004). A comparação mostrou uma concordância entre os dados experimentais e os numéricos.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A presente pesquisa foi realizada no Laboratório Computacional de Térmicas e Fluido da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande– PB.

Para a modelagem numérica propõe-se a utilização do pacote comercial Ansys CFX[®], que é formado por softwares de código fechado, ou seja, que já possui equações discretizadas a serem utilizadas para a solução do problema. Este pacote possui diversos programas e os utilizados na pesquisa são: Ansys ICEM-CFD[®], Ansys CFX[®].

No ICEM-CFD[®] são construídas as geometrias a partir de pontos, curvas e superfícies. Sobre a geometria é construída a malha numérica, que é a subdivisão do domínio espacial em espaços pequenos, chamados de elementos, ou seja, é a discretização de um domínio contínuo para que as equações do fenômeno que esteja ocorrendo possam ser resolvidas pelo computador. O software permite a construção de malhas tetraédricas, cujos elementos possuem formato de pirâmide de base triangular, e hexaédricos, cujos elementos possuem formato de paralelepípedos.

O pré-processador (CFX-Pre[®]) utiliza um arquivo de geometria e malha, que nesse caso é construído no ICEM-CFD, para a geração de um arquivo onde são escolhidos os modelos matemáticos e as ferramentas numéricas necessárias para a solução da simulação numérica, gerando desta forma um modelo numérico. O processador (CFX-Solver[®]) é um módulo de solução numérica, onde as técnicas numéricas de volumes finitos baseadas em elementos finitos são empregadas para a solução do modelo numérico gerado no pré-processador. O pós-processador (CFX-Post[®]) é utilizado para a visualização científica dos resultados obtidos no processador na forma de mapa de cores, vetores e animações gráficas.

3.1 O problema físico e a geometria

A presente pesquisa trata da secagem em estufa de tijolos cerâmicos industriais vazados. Os dados experimentais necessários para a validação da modelagem matemática foram extraídos de Silva (2009).

3.1.1 Descrição da estufa e tijolo

A secagem experimental de tijolos cerâmicos feita por Silva (2009) ocorreu no interior de uma estufa com circulação mecânica de ar de fabricação da FANEM mod. 320E (Figura 3.1). O percurso que o ar faz dentro da estufa é esquematizado na Figura 3.2. A Figura 3.3 exhibe a imagem de um dos tijolos cerâmicos vazados utilizados por Silva (2009).



Figura 3.1: Estufa com circulação de ar forçada
Fonte: Silva (2009).

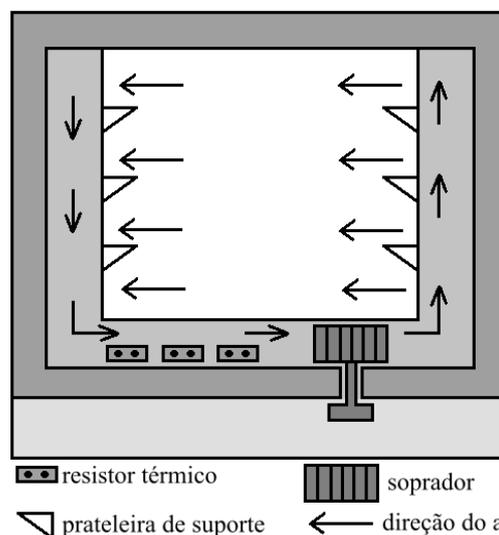


Figura 3.2: Esquema de funcionamento da estufa com circulação de ar forçada



(a)



(b)

Figura 3.3: Foto do tijolo cerâmico vazado, no instante inicial, utilizado para secagem em estufa a 50°C.
Fonte: Silva (2009).

3.1.2 Domínio de estudo e computacional

Para reproduzir o domínio de estudo da estufa foram feitas medições manuais das suas dimensões para poder construir sua geometria no software ICEM CFD. O posicionamento do tijolo no interior da estufa foi tomado como se ele tivesse sido colocado

na bandeja inferior. Através do manual do equipamento, verificou-se a entrada e a saída do ar de secagem para poder reproduzir o sentido do fluxo de ar na simulação numérica.

As Figuras 3.4 e 3.5 ilustram, respectivamente, a geometria do tijolo e a da estufa, juntamente com suas dimensões, contendo o tijolo cerâmico vazado. A geometria foi construída utilizando o software ICEM CFD.

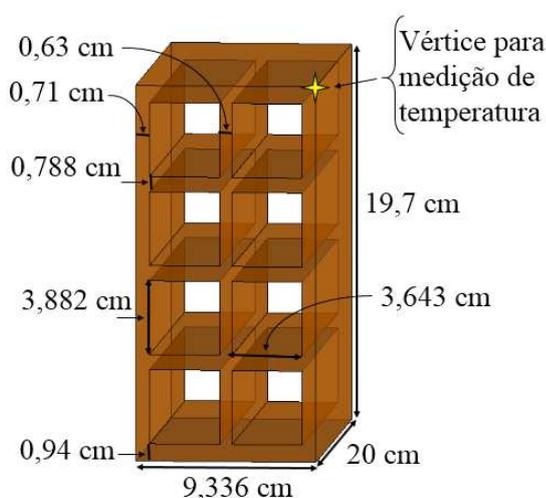


Figura 3.4: Geometria representativa do tijolo cerâmico

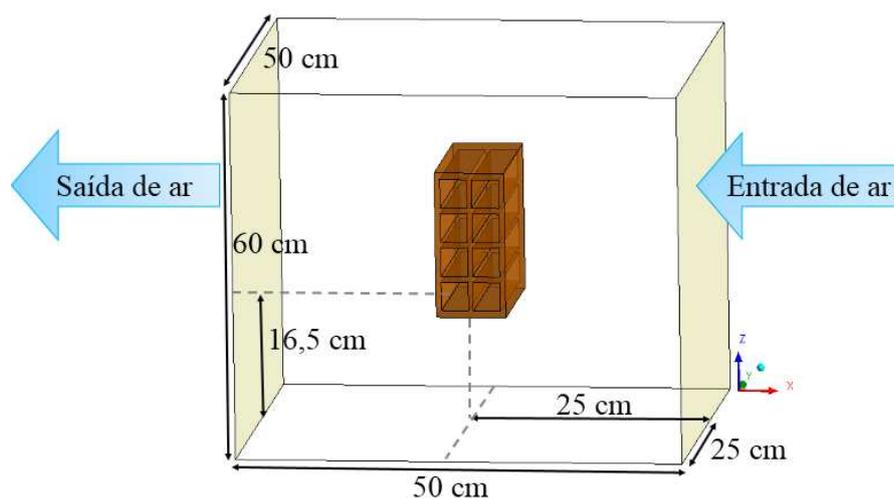


Figura 3.5: Geometria representativa da estufa com tijolo cerâmico

A partir da geometria foi construída, com a estratégia de blocagem, a malha hexaédrica sobre o tijolo (Figura 3.6) com 66.769 elementos hexaédricos e sobre a estufa (Figura 3.7) contendo 673.625 elementos hexaédricos e 631.584 nós. O refinamento do tijolo é projetado para todas as direções da malha em torno do tijolo. É necessário lembrar que o refinamento da malha da estufa só foi realizado após a análise dos resultados da dependência de malha feita para o tijolo sozinho.

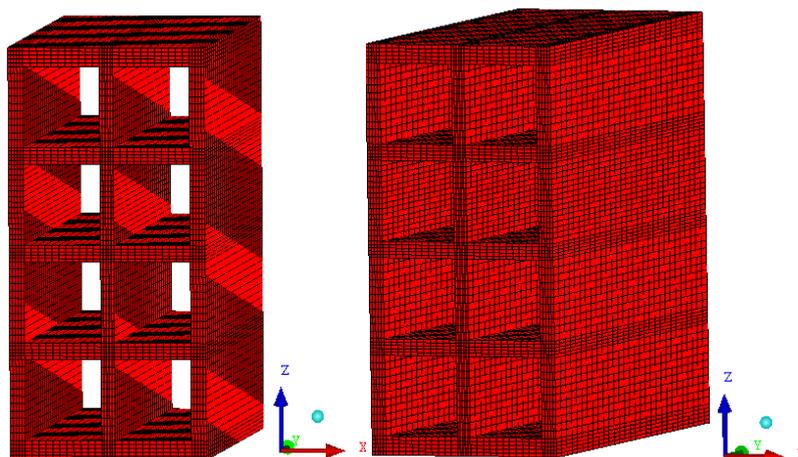


Figura 3.6: Malha hexaédrica gerada sobre o tijolo com um de seus refinamentos.

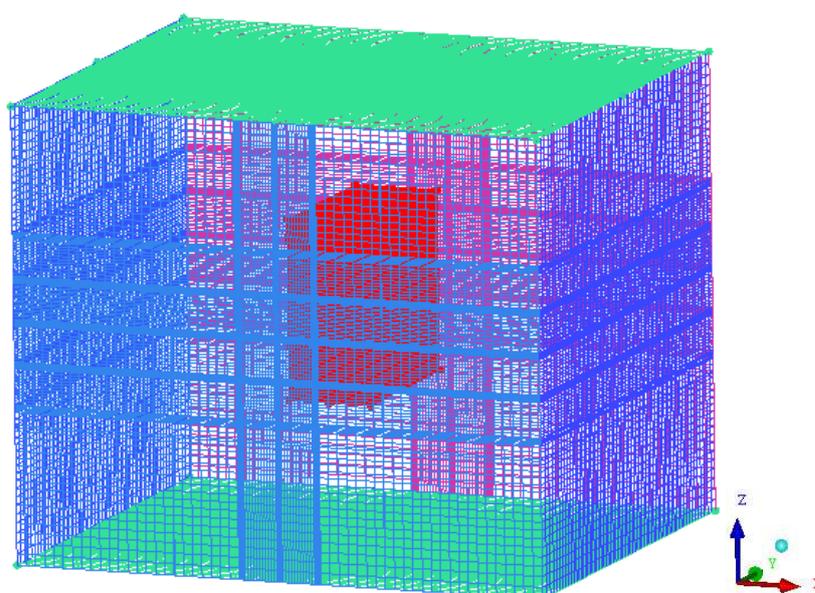


Figura 3.7: Malha numérica sobre o domínio da estufa com tijolo contendo 673.625 elementos hexaédricos

3.2 Modelagem matemática

A modelagem matemática consiste em dois domínios, o sólido, que representa o tijolo cerâmico, e o fluido, que representa o ar no interior da estufa.

3.2.1 Equações constitutivas

3.2.1.1 Fase sólida

As equações governantes consideradas na modelagem matemática foram a conservação de massa e energia e a equação de fluxo de fluido no estado transiente.

A equação da transferência de calor é dada por:

$$\frac{\partial(\rho_s H_s)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) \quad (3.1)$$

em que ρ_s é a massa específica, H_s é a entalpia, t é o tempo, λ_s é a condutividade térmica e T_s é a temperatura.

A equação da transferência de massa dentro do domínio sólido é inserida como uma variável adicional, sendo descrita por:

$$\frac{\partial m}{\partial t} - \nabla \cdot (D_{ms} \nabla m) = 0 \quad (3.2)$$

em que m é a massa de água no material e D_{ms} é o coeficiente de difusão mássico no sólido.

3.2.1.2 Fase fluida

Para a fase fluida (ar), as equações constitutivas são: conservação da massa, equação de transporte para a variável adicional, conservação de quantidade de movimento do ar, e conservação de energia.

A equação da conservação da massa do ar no domínio fluido é dada como segue:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U}) = 0 \quad (3.3)$$

onde ρ_f é a massa específica do ar e \mathbf{U} é a velocidade do ar dentro da estufa.

A equação de transporte para a variável adicional que descreve o fluxo de massa de água no domínio fluido é dada por:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (m \mathbf{U}) = \nabla \cdot (D_{mf} \Delta m) \quad (3.4)$$

A equação da conservação do momento linear é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \mathbf{U}) = -\nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu_{eff} \left[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right] \right\} + \mathbf{S}_M \quad (3.5)$$

onde ∇p é o gradiente de pressão, μ_{eff} é a viscosidade dinâmica efetiva e \mathbf{S}_M é o termo fonte do momento linear.

Para prever o comportamento turbulento pelo fluxo de fluido no domínio, escolheu-se o modelo de turbulência κ - ε . Este modelo é classificado como um modelo a duas equações (Barbosa, 2011; Ansys, 2013), o referido modelo tem sido considerado como um modelo padrão na indústria. Para este modelo, a viscosidade do fluido é dada por:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.6)$$

onde μ_t é a viscosidade turbulenta que é definida por:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (3.7)$$

onde C_μ é uma constante de valor igual a 0,09, e κ e ε representam a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação de energia, respectivamente.

Os parâmetros κ e ε são obtidos a partir da solução das seguintes equações (Barbosa, 2011; Ansys, 2013):

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] + P_\kappa - \rho\varepsilon + P_{\kappa b} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1} P_\kappa - C_{\varepsilon 2} P_\varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\kappa b}) \quad (3.9)$$

onde: $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_\kappa = 1,0$ e $\sigma_\varepsilon = 1,3$, e $P_{\kappa b}$ e P_b representam a influência das forças de campo.

Para a transferência de calor no fluido adotou-se o modelo de energia térmica, o qual é adequado para fluxos a baixas velocidades. Desconsiderando o aquecimento interno devido ao atrito e o termo fonte, a equação que descreve a referida transferência de calor é dada por:

$$\frac{\partial(\rho_f H_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U} h_f) = \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) \quad (3.10)$$

onde λ_f é a condutividade térmica, h_f é a entalpia e T_f é a temperatura do ar.

3.2.1.3 Interface entre as fases fluidas e sólidas

Para desenvolver a modelagem matemática, considerou-se a passagem da variável adicional (massa de água) entre os domínios. Para isto, a condição de fluxo conservativo na

interface (*conservative interface flux*) foi adotada. Esta condição significa que a variável flui em um domínio, atravessa a interface e segue seu fluxo no outro domínio sem haver perdas. Quando se trata de um domínio sólido e um fluido, isto significa dizer que a variável que se difunde pelo sólido via difusão atravessa a interface e se difunde pelo fluido via convecção, caracterizando uma condição de contorno de terceira espécie (ou ordem).

Nesse caso, o fluxo difusivo da massa de água na camada limite sobre o tijolo é igual ao fluxo conservativo da massa de água no ar. Então, escreve-se:

$$-D_{mf} \nabla m_{\text{interface}} = h_m (m_{\text{interface}} - m_{\text{eq-interface}}) \quad (3.11)$$

onde $m_{\text{interface}}$ é a massa de água na interface; $m_{\text{eq-interface}}$ é a massa de água na interface na condição de equilíbrio, e h_m é o coeficiente de transferência de massa convectivo.

Na Equação 3.11 a única propriedade inicialmente estabelecida refere-se à difusividade de massa no ar.

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

$$-\lambda_f \nabla T_{\text{interface}} = h_C (T_{\text{eq-interface}} - T_{\text{interface}}) \quad (3.12)$$

onde λ_f é a condutividade térmica do ar; $T_{\text{interface}}$ é a temperatura na interface; $T_{\text{eq-interface}}$ é a temperatura de equilíbrio na interface e h_C é o coeficiente de transferência de calor convectiva.

3.2.2 Condições iniciais e de contorno

a) Tijolo isoladamente

Para as simulações da secagem utilizando-se apenas o domínio sólido, as condições de contorno, cujos valores estão nas Tabelas 3-2 e 3-3, são:

- Parede do domínio:
 - Massa de água de equilíbrio, $m_{s\text{-}eq}$;
 - Coeficiente de transferência de calor convectiva, h_C ;
 - Temperatura externa, T_{ext} ;
- Interior do domínio sólido:

- Coeficiente de difusão mássico, D_{massa} ;
- Massa específica do material sólido, ρ_S ;
- Calor específico, c_S ;
- Condutividade térmica, λ_S ;

As condições iniciais do domínio sólido são:

- Massa de água inicial, m_{s_in} ;
- Temperatura média inicial, T_{s_in} ;

b) Estufa com tijolo

Para as simulações da secagem do tijolo considerando-se a estufa, as condições de contorno são:

- Fluxo conservativo na interface entre os dois domínios;
- Entrada da estufa:
 - vazão mássica de ar, $\dot{m}_{ar\ seco}$;
 - vazão mássica de água, \dot{m}_{agua} ;
- Saída da estufa: pressão do sistema, P ;
- Paredes da estufa: parede lisa e adiabática.

As condições iniciais são:

- Domínio sólido:
 - Massa de água inicial, m_{s_in} ;
 - Temperatura média inicial, T_{s_in} ;
- Domínio fluido:
 - Massa de água inicial, m_{f_in} ;
 - Temperatura média inicial, T_{f_in} ;

3.2.3 Propriedades físico-químicas do fluido e sólido

O tijolo cerâmico (domínio sólido) possui as seguintes propriedades:

- Massa específica: 1985,8 kg/m³ (Almeida, 2009);
- Calor específico: 1673 J/(kg/K) (Almeida, 2009);
- Condutividade térmica: 1,675 W/(m.K) (Çengel e Ghajar, 2012).

O domínio fluido é constituído de ar (como gás ideal) com as seguintes propriedades físico-químicas:

- Calor específico: 1004,4 J/(kg/K);
- Condutividade térmica: 0,0261 W/(m.K);
- Viscosidade dinâmica: $1,831 \times 10^{-5}$ kg/(m.s)
- Massa específica: 1,092 kg/m³ (50°C), 1,060 kg/m³ (60°C), 1,029 kg/m³ (70°C), 1,000 kg/m³ (80°C), 0,972 kg/m³ (90°C) e 0,946 kg/m³ (100°C).

3.2.4 Casos simulados

3.2.4.1 Teste de malha

Para se obter resultados que independem da malha, faz-se necessário realizar o teste de dependência de malha, que é caracterizado pela simulação do mesmo problema físico, com as mesmas condições iniciais e de contorno, variando-se a quantidade de elementos que compõem as malhas numéricas. As condições devem ser a mesma para que as diferenças nos resultados sejam justificadas pelo refinamento da malha. O intuito é saber se os resultados variam com a mudança do número de elementos da malha pois, quanto maior a quantidade de elementos, maior é o esforço computacional para convergir a simulação. No teste, a malha escolhida para prosseguir com as simulações é aquela a partir da qual os resultados passam a ter valores constantes ou valores cujas diferenças são insignificantes.

Sobre a geometria foi construída uma malha hexaédrica multiblocos, composta por sólidos hexaédricos, e a mesma foi refinada em vários níveis diferentes, resultando em malhas com diferentes números de elementos e nós.

Devido às transferências de calor e massa que mais influenciam no processo de secagem ocorrerem no interior do domínio sólido, acredita-se que a realização do teste de malha utilizando-se apenas o domínio sólido na simulação numérica é necessária para fornecer confiabilidade à malha construída. Observe que a malha utilizada é hexaédrica e a estratégia de blocagem usada para construí-la faz com que os parâmetros de refinamento no domínio sólido sejam reproduzidos no domínio fluido. Além disso o volume da estufa ($1,49 \times 10^{-1} \text{m}^3$) é cerca de cem vezes maior que o volume do domínio sólido ($1,42 \times 10^{-3} \text{m}^3$), e tendo em vista os recursos computacionais disponíveis, torna-se inviável um refinamento muito elevado na região da estufa.

A estratégia de refinamento é ilustrada na Figura 3.8 e o número de nós em cada aresta, assim como o número total de elementos, são apresentados na Tabela 3-1. A estrutura da malha hexaédrica sobre o tijolo é exibida na Figura 3.6.

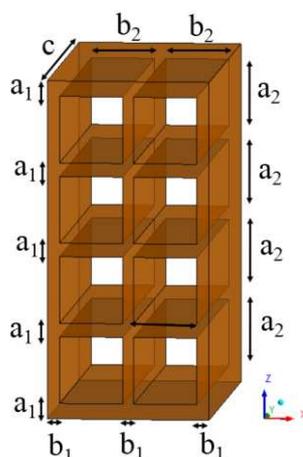


Figura 3.8: Geometria com as arestas denominadas para o teste de dependência de malha.

Tabela 3-1: Dados de refinamento da malha numérica.

| Nome da malha | Número de nós nas arestas | | | | | Número de nós totais | Número de elementos totais |
|---------------|---------------------------|----|----|----|----|----------------------|----------------------------|
| | a1 | a2 | b1 | b2 | c | | |
| Malha A | 4 | 8 | 4 | 8 | 20 | 15360 | 19301 |
| Malha B | 6 | 12 | 6 | 12 | 30 | 56880 | 66769 |
| Malha C | 8 | 16 | 8 | 16 | 40 | 136960 | 154953 |
| Malha D | 10 | 20 | 10 | 20 | 50 | 267000 | 295163 |

O teste de dependência de malha foi realizado para a simulação numérica da secagem do tijolo cerâmico desconsiderando o meio externo. Nesse teste, a difusividade da água no interior do tijolo e o coeficiente de transferências de calor em suas paredes foram tomados do trabalho de Silva (2009).

A umidade presente no interior do domínio sólido foi escolhida como sendo a massa de água, em gramas, e foi acrescentada na simulação a partir de uma variável adicional.

As simulações foram realizadas em um computador com processador core i7 5ª geração, uma memória RAM de 6GB, um disco rígido de 1TB.

Para o domínio sólido foram adotadas as considerações de ausência de reação química, de fonte de calor e de mudança de fase, escoamento transiente, tempo total de escoamento de 860 minutos com um passo de tempo de 10 segundos. O valor quadrático médio (RMS - *root mean square*) de 10^{-8} foi escolhido como critério de convergência. A

Tabela 3-2 apresenta os dados úteis para a simulação numérica da secagem do tijolo cerâmico para o teste de dependência de malha.

Tabela 3-2: Dados úteis para as simulações numéricas do teste de malha

| | |
|---|--|
| Temperatura do ar de secagem [°C]* | 100 |
| Difusividade da umidade no tijolo [m ² /s]* | 16x10 ⁻¹⁰ m ² /s |
| Temperatura inicial do tijolo [°C]* | 26,1 |
| Massa de água inicial no tijolo [g]* | 440 g |
| Tempo total de secagem [min]* | 860 minutos |
| Massa de água de equilíbrio [g]* | 1 |
| Coefficiente de transferência de calor convectivo [W/(m ² K)]* | 2,68445 |

Fonte: *Silva (2009).

3.2.4.2 Aplicação e secagem de tijolo cerâmico industrial

a) Descrição dos experimentos

O estudo de Silva (2009) consistiu na secagem de tijolos cerâmicos em uma estufa utilizando o ar de secagem a 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. O experimento inicia-se ao inserir na estufa já aquecida um tijolo cerâmico úmido à temperatura ambiente. Nas primeiras horas, o tijolo era retirado da estufa a cada 10 minutos para medir as suas dimensões, sua temperatura e a sua massa. Após aproximadamente 5 horas de secagem, o intervalo entre as medições de massa, temperatura e dimensões subiu para 30 minutos, sendo as medidas realizadas até o pesquisador perceber que as variáveis se tornaram aproximadamente constante.

Para cada temperatura de secagem o autor calculou a umidade relativa do ar e a velocidade de escoamento do ar no interior da estufa e plotou curvas das cinéticas de aquecimento e de secagem do material cerâmico.

b) Casos estudados

Foram reproduzidos os testes de secagem a 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. Para os domínios sólido e fluido são adotadas as considerações de ausência de reação química e de fonte de calor.

O coeficiente de difusão da umidade no tijolo (D_{ij}) encontrado experimentalmente variou para cada temperatura do ar de secagem. Como nas simulações numéricas do presente estudo optou-se por usar a massa de água (variável adicional, em gramas) nos domínios sólido e fluido, os coeficientes de difusão da umidade no tijolo tiveram que ser adaptados, visto que mudaram-se as ordens de grandeza dos valores da variável de transporte de massa. Além disso, o tijolo foi considerado como um domínio sólido, diferentemente do tijolo real, que é poroso. A adaptação ocorreu por tentativa e erro, onde vários valores de difusividade foram aplicados até encontrar aqueles que forneceram resultados numéricos mais próximos dos experimentais.

A escolha de usar massa de água ocorreu devido ao fato de a massa ser uma variável comum aos dois domínios. Desta forma, a umidade pode circular entre os domínios sólido e fluido sem problemas de unidade. Os cálculos psicrométricos realizados para se chegar aos valores de massa de água nos domínios estão no Anexo B.

Na interface entre os domínios líquido e sólido foi inserida a condição de fluxo conservativo. Isto quer dizer que, toda a massa de água que percorre o material sólido por difusão, ao chegar na interface, passa para o meio fluido e se dispersa por convecção na forma de vapor.

As simulações são transientes, com passo de tempo de 10 segundos e um resíduo médio quadrático de 10^{-8} . A Tabela 3-3 apresenta os dados utilizados nas simulações, a depender do tipo de análise. As simulações foram realizadas em um computador com processador core i5 3ª geração, uma memória RAM de 8GB, um disco rígido de 500GB.

Os dados como temperatura do ar de secagem, temperatura inicial do tijolo, umidade relativa do ar, velocidade do ar, massa de água inicial e tempo total de secagem foram retirados diretamente de Silva (2009), enquanto que os valores da vazão mássica do ar e do vapor, assim como o coeficiente de difusão da umidade no ar, foram determinados conforme roteiro de cálculo no Anexo B. A difusividade da massa de água no tijolo cerâmico foi obtida por aproximação aos dados experimentais.

Os dados inseridos no programa como condição de contorno para as simulações foram: temperatura do ar de secagem, vazão mássica do ar, vazão mássica do vapor, coeficiente de difusão da umidade no ar, tempo total de secagem, além da difusividade da umidade no tijolo conforme descrita anteriormente. Como condições iniciais são inseridas: temperatura inicial do tijolo e massa de água inicial no tijolo e no ar da estufa.

Tabela 3-3: Dados úteis para as simulações numéricas da secagem do tijolo cerâmico

| | | | | | | |
|--|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Temperatura do ar de secagem [°C]* | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| Difusividade da umidade no tijolo [m ² /s]* | 4x10 ⁻¹⁰ | 0,3x10 ⁻¹⁰ | 0,9x10 ⁻¹⁰ | 8x10 ⁻¹⁰ | 10x10 ⁻¹⁰ | 16x10 ⁻¹⁰ |
| Temperatura inicial do tijolo [°C]* | 20,6 | 20,5 | 26 | 21,4 | 21 | 26,1 |
| Umidade relativa do ar [%]* | 20,8 | 13,58 | 7,68 | 4,68 | 3,3 | 1,8 |
| Velocidade do ar [m/s]* | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,1 |
| Massa de água inicial no tijolo [g]* | 365 | 386 | 408 | 394 | 420 | 440 |
| Massa de água inicial na estufa [g]** | 2,62601 | 2,68886 | 2,30198 | 2,06730 | 2,10014 | 1,60376 |
| Vazão mássica do ar [g/s]** | 13,65458 | 15,89367 | 18,00225 | 19,99141 | 21,87102 | 23,64989 |
| Vazão mássica do vapor [g/s]** | 0,22092 | 0,27145 | 0,27112 | 0,27827 | 0,31802 | 0,26984 |
| Coefficiente de difusão da umidade no ar [m ² /s]** | 2,728x10 ⁻⁵ | 2,8948x10 ⁻⁵ | 3,0662x10 ⁻⁵ | 3,2419x10 ⁻⁵ | 3,4218x10 ⁻⁵ | 3,6058x10 ⁻⁵ |
| Tempo total de secagem [min]* | 990 | 820 | 950 | 900 | 690 | 860 |

Fonte: *Silva (2009), **Estimado.

c) Tratamento estatístico de dados

O tratamento estatístico é utilizado em dois momentos da pesquisa: no teste de dependência de malha e na escolha da difusividade mássica para cada temperatura. Para transmitir confiabilidade ao modelo matemático adotado, três tratamentos estatísticos foram utilizados: o erro médio, a medida de dispersão e o coeficiente de correlação de Pearson. A medida de dispersão foi a referência para a escolha da malha numérica e para determinar as difusividades mássicas.

c1) Erro médio

O erro médio, representado por E_m , é a medida do desvio entre os valores esperados (experimentais) e os obtidos (numérico):

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n |(V_{Num} - V_{Exp}) / V_{Exp}|}{n} \quad (3.13)$$

onde V_{Num} é o valor numérico ou encontrado, V_{Exp} é o experimental e n é o número de medidas efetuadas.

c2) Medidas de dispersão

O erro relativo ($ERMQ$) é dado pelo somatório dos quadrados das diferenças entre os valores numéricos, V_{num} , e os valores experimentais, V_{exp} :

$$ERMQ = \sum_{i=1}^n (V_{num} - V_{exp})^2 \quad (3.14)$$

A variância dos quadrados dos resíduos (δV^2) é dada por:

$$\delta V^2 = \frac{ERMQ}{n - n_p} \quad (3.15)$$

onde n_p é o número de parâmetros ajustados (número de graus de liberdade), (Silva, 2009). Como a única variável a ser ajustada é o coeficiente de difusão de massa, pois os demais valores foram retirados da literatura ou calculado durante a simulação numérica, o n_p é 1.

c3) Coeficiente de correlação de Pearson

Em estatística descritiva, o coeficiente de correlação de Pearson (r_p) mede o grau da correlação entre duas variáveis, e assume apenas valores entre -1 e 1, onde:

- $r_p = 1$ Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.
- $r_p = -1$ Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis. Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui.
- $r_p = 0$ Significa a independência linear entre as duas variáveis.

A equação utilizada para calcular o coeficiente de correlação de Pearson é dada por:

$$r_p = \frac{n \sum (V_{Exp} V_{Num}) - (\sum V_{Exp})(\sum V_{Num})}{\sqrt{n \sum (V_{Exp}^2) - (\sum V_{Exp})^2} \sqrt{n \sum (V_{Num}^2) - (\sum V_{Num})^2}} \quad (3.16)$$

c4) Ajuste do coeficiente de transferência de massa convectiva

Uma vez que foi estimado o coeficiente de difusão mássica no interior do domínio sólido, procede-se com o cálculo do valor médio do coeficiente de transferência de massa convectiva para cada temperatura de secagem.

A estimativa da difusividade mássica é feita considerando a geometria do material em coordenadas cartesianas. Para o eixo Z, por exemplo, a Equação 3.11 é escrita na forma:

$$-D_{mf} \frac{\partial m_{\text{interface}}}{\partial z} = h_m (m_{\text{interface}} - m_{\text{eq-interface}}) \quad (3.17)$$

onde D_{mf} [m²/s] é a difusividade da massa de água no ar, $m_{\text{interface}}$ [g] é a massa de água na interface no instante t, $m_{\text{eq-interface}}$ [g] é a massa de água no equilíbrio e h_m [m/s] é o coeficiente de convecção de massa de água no ar.

c5) Coeficiente de difusão em função da temperatura

A difusividade de umidade também depende, e fortemente, da temperatura. Sua dependência pode ser descrita pela equação de Arrhenius (Corrêa *et. al.*, 2006), na forma:

$$D_{ms} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3.18)$$

onde D_0 [m²/s] é o fator de Arrhenius, E_a [kJ/mol] é a energia de ativação para a difusão, R [kJ/(kmol.K)] é a constante dos gases e T [K] é a temperatura.

Aplicando o logaritmo neperiano em ambos os lados da Equação 3.18, chega-se à Equação 3.19, a qual se assemelha à equação da reta com coeficiente angular de E_a/R e coeficiente linear de $\ln(D_0)$:

$$\ln D_{ms} = \left(-\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{T} + \ln D_0 \quad (3.19)$$

Para encontrar a equação de Arrhenius, adiciona-se no *software* Grapher[®] versão 8 os dados da difusividade mássica para cada temperatura. Sobre os dados é inserida uma linha de tendência, que é a função que melhor se ajusta a uma série de pontos, pré-definida do tipo linear. Esta é uma linha reta, expressada por uma função do tipo $f(x) = a \cdot x + b$, onde a e b são constantes calculadas de tal forma que a linha em questão seja a de melhor ajuste à série de pontos. A linha de tendência é calculada de maneira que a soma dos quadrados dos resíduos (método dos mínimos quadrados) seja a menor possível. A equação da reta encontrada é comparada com a Equação 3.19, encontrando-se, assim, os dados da energia de ativação e do fator de Arrhenius.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Teste de dependência de malha

Os valores numéricos obtidos, juntamente com os experimentais (Silva, 2009), da massa de água no interior do tijolo e da temperatura aferida no vértice do tijolo para os diversos tempos ao longo da secagem estão reportados no Anexo A (Tabelas A-1 e A-2) para a temperatura de secagem de 100°C.

A partir da comparação dos valores numéricos de massa e calor com os valores experimentais, foram tomadas a média dos erros (E_M), o erro relativo ($ERMQ$), a variância dos quadrados dos resíduos (δV), além do coeficiente de correlação de Pearson (r_p). Os valores dos parâmetros estatísticos do teste de dependência de malha para calor e massa estão expostos na Tabela 4-1.

Analisando os dados da Tabela 4-1, observa-se que os erros médios, os desvios quadráticos e a correlação de Pearson variam muito pouco a partir da Malha B. Tomando-se o erro relativo ($ERMQ$) como referência, optou-se pelo uso da Malha B para prosseguir com a pesquisa. As malhas mais refinadas (Malha C e D) possuem um custo computacional elevado, e não compensa a precisão numérica que se ganha ao usá-la.

Tabela 4-1: Resultados do teste de dependência de malha

| | E_M (%) | | ERMQ | | δV^2 | | r_p | | Tempo total de simulação |
|-------------------------------|-----------|------------|-----------|------------|--------------|------------|-----------|------------|--------------------------|
| | Massa [g] | Calor [°C] | Massa [g] | Calor [°C] | Massa [g] | Calor [°C] | Massa [g] | Calor [°C] | |
| Malha A (19301 elementos) | 30,9 | 15,7 | 43034 | 74,3 | 1229,5 | 0,5 | 0,990 | 0,954 | 1h 27min 55s |
| Malha B (66769 elementos) | 45,2 | 15,7 | 349 | 74,3 | 1,3 | 0,5 | 0,967 | 0,954 | 4h 28min 6s |
| Malha C (154953 elementos) | 47,6 | 15,7 | 379 | 74,3 | 1,4 | 0,5 | 0,962 | 0,954 | 14h 35min 23s |
| Malha D (295163 elementos) | 48,2 | 15,7 | 386 | 74,3 | 1,4 | 0,5 | 0,961 | 0,954 | 1dia 9h 5min 38s |

Para observar o comportamento da massa de água e da temperatura ao longo da secagem, são apresentadas as Figuras 4.1 e 4.2. Após análise dessas figuras, nota-se que há um ligeiro distanciamento entre os dados numéricos e experimentais devido ao fato de se ter

adotado massa de água como umidade juntamente com a difusividade mássica obtida por Silva (2009) para umidade em base seca. Apesar de haver essa diferença, ela não interfere na realização do teste de dependência de malha. As curvas exibidas mostram que para a massa de água os resultados quase não variam a partir da Malha B, enquanto que a temperatura praticamente não recebe influência do número de elementos no domínio. Logo, opta-se por utilizar a Malha B como malha mais adequada para o estudo, tanto em precisão numérica quanto em realismo físico e tempo computacional.

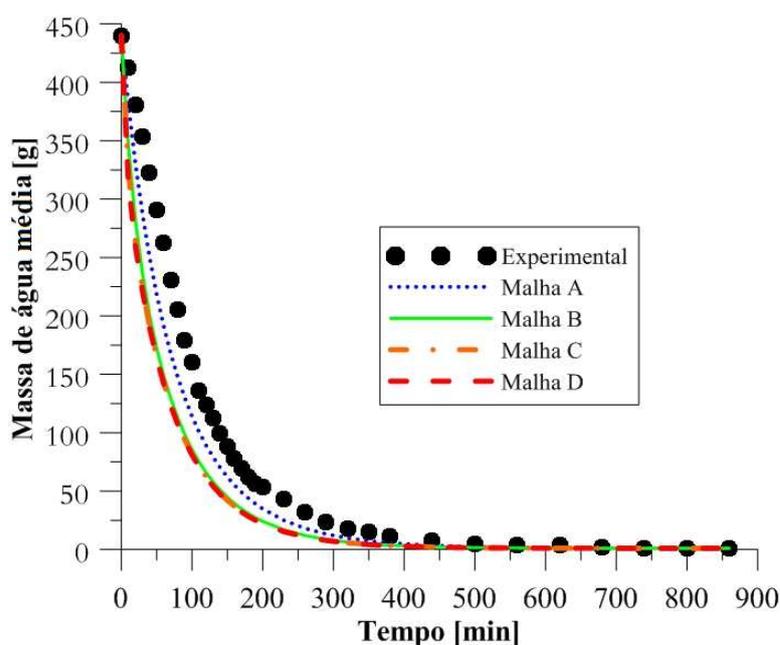


Figura 4.1: Massa de água média no tijolo em função do tempo para diferentes malhas.

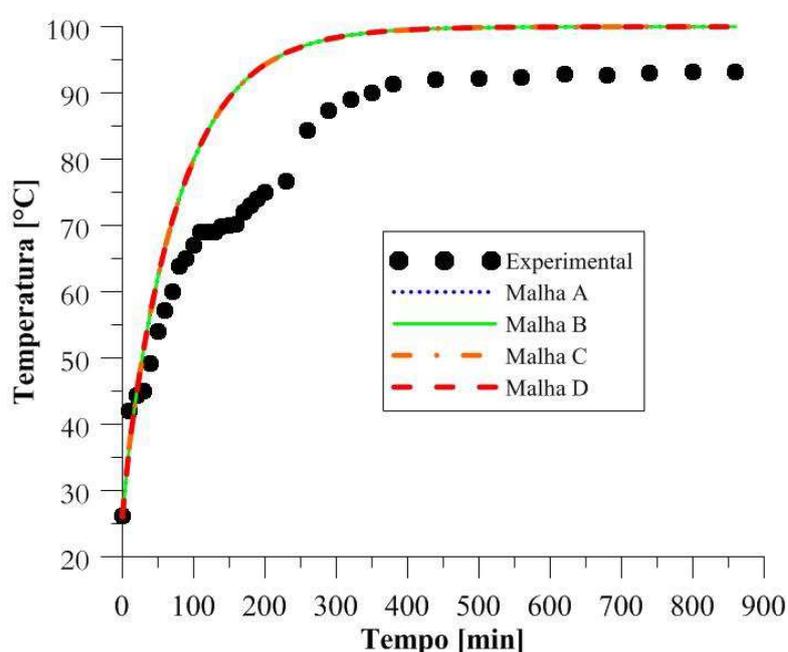


Figura 4.2: Temperatura no vértice do tijolo em função do tempo para diferentes malhas.

4.2 Aplicação da secagem do tijolo na estufa

Cada simulação numérica envolvendo a estufa durou cerca de 8 dias em computador com processador Core i5 terceira geração com 8GB de memória RAM.

4.2.1 Análise termo-gravimétrica e estimação de parâmetros de processo: validação

No modelo matemático utilizado para a análise da cinética de aquecimento e de secagem do tijolo, as equações de calor e de massa estão desacopladas. A variação temporal da temperatura do tijolo e da massa de água em seu interior para as secagens a 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C estão no Anexo C.

4.2.1.1 Cinética de aquecimento do tijolo

Os valores temporais da temperatura do tijolo foram calculados no vértice, conforme ilustrado na Figura 4.3, e comparados com os dados experimentais que também foram aferidos no vértice (Figura 2.22).

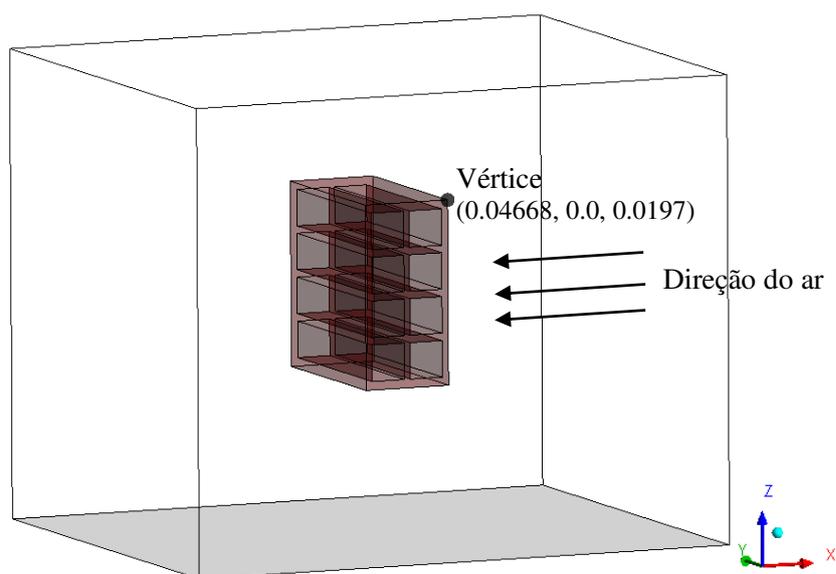


Figura 4.3: Vértice para a obtenção da variação da temperatura do tijolo

Os valores das temperaturas no vértice do tijolo, previstas com o uso da Equação 3.1, e os valores experimentais (Silva, 2009), estão plotados nas Figuras 4.4 a 4.9.

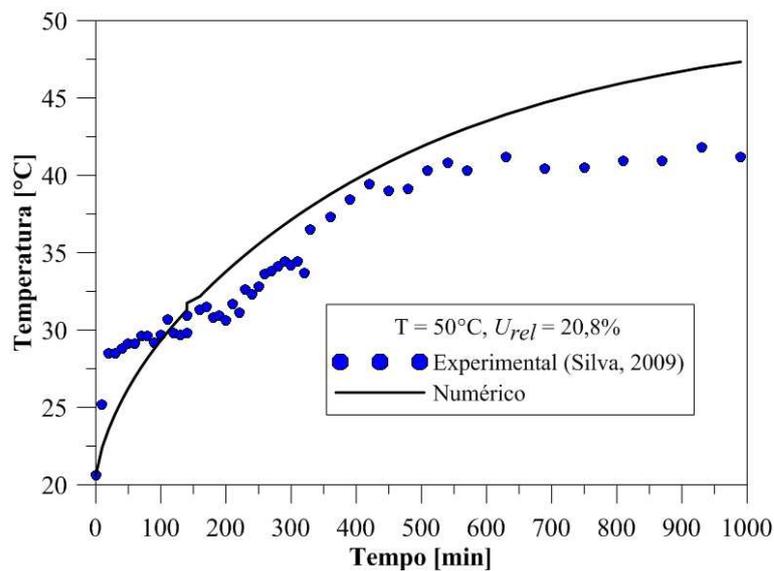


Figura 4.4: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$).

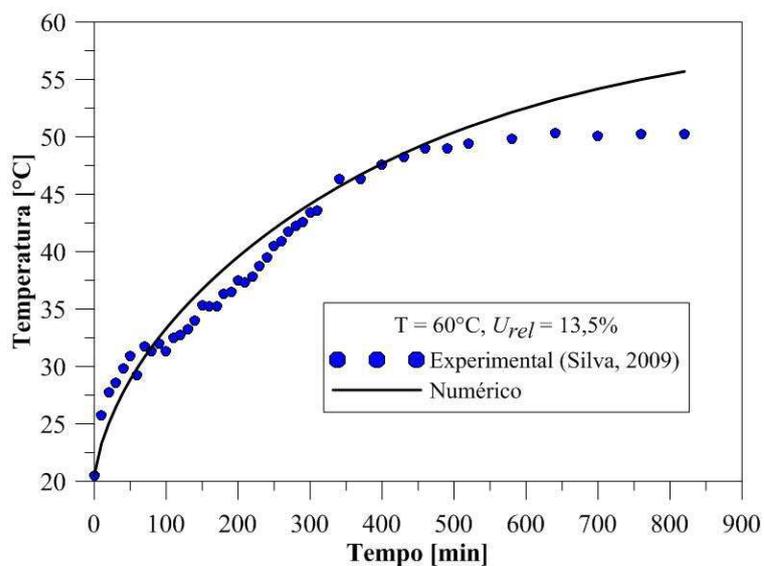


Figura 4.5: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$).

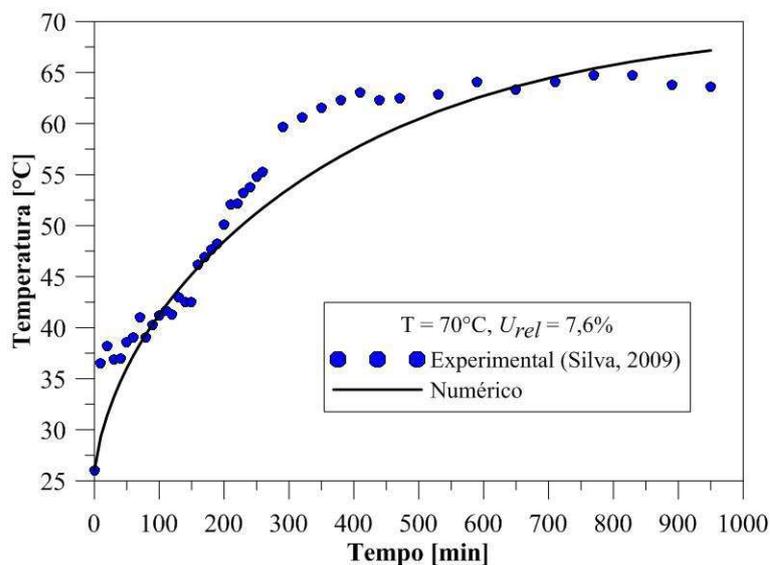


Figura 4.6: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$).

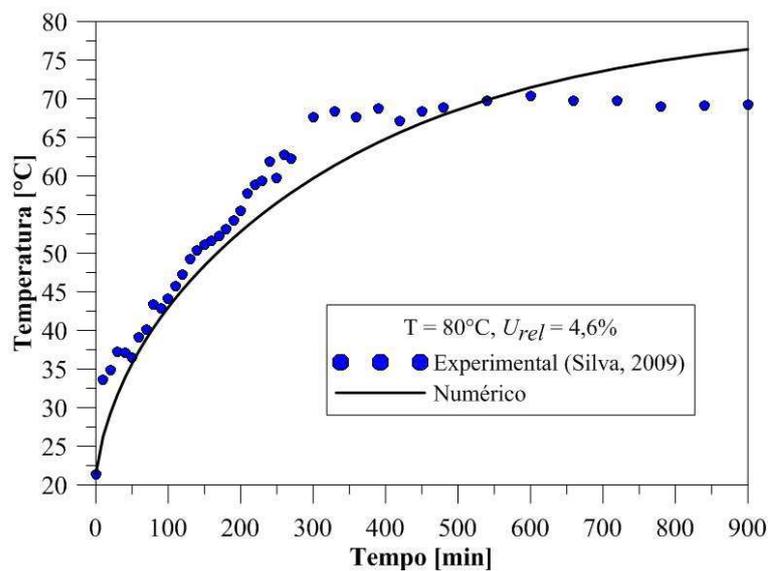


Figura 4.7: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$).

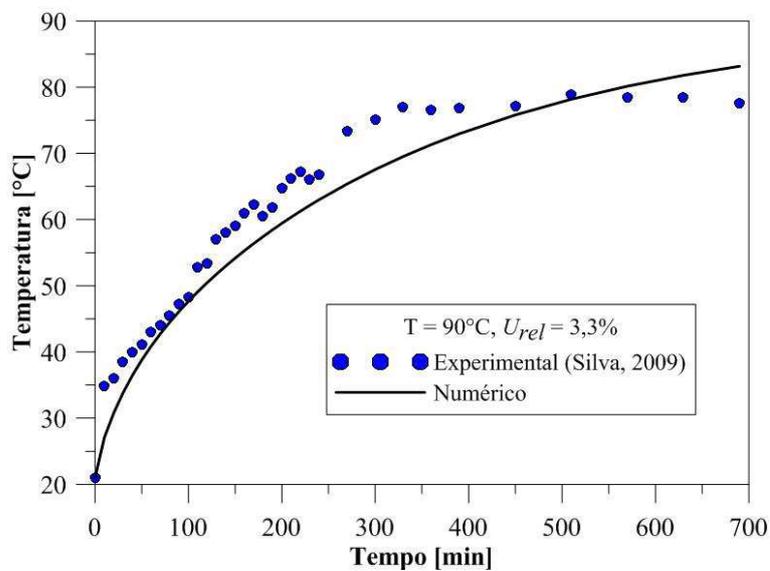


Figura 4.8: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$).

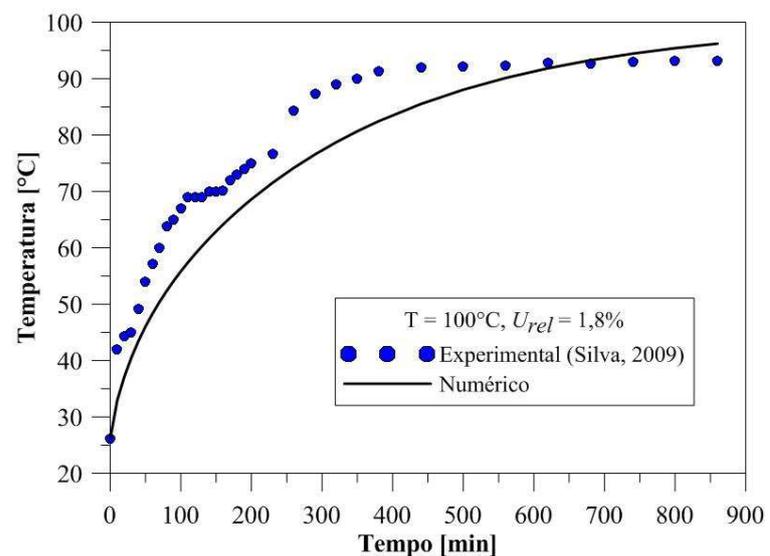


Figura 4.9: Temperatura no vértice do tijolo durante o processo de secagem ($T = 100^{\circ}\text{C}$).

Após análise dessas figuras, observa-se que a curva numérica apresenta valores abaixo dos experimentais nos tempos iniciais do processo e, após um certo tempo, o processo se inverte, e a curva numérica se coloca acima dos dados experimentais. Este comportamento é comum para todas as temperaturas e tal fenômeno pode ter como explicação o fato de se ter adotado propriedades termofísicas constantes no domínio sólido e a não consideração da energia necessária para evaporar a água do produto, a qual não é prevista no modelo de difusão líquida.

Assim, o calor transferido ao sólido, por convecção, é transformado apenas em calor sensível para o aquecimento do tijolo, enquanto que na prática, o calor é transformado em calor sensível para o aquecimento da massa de argila e da umidade do tijolo e em calor latente de vaporização da umidade. Logo, a taxa de aquecimento experimental é menor do que aquela predita pelo modelo considerado nesta pesquisa.

A ligeira discrepância entre os dados experimentais e numéricos também pode ser explicada pelo fato de o tijolo cerâmico ser considerado como um domínio sólido constituído de argila e água representada pela variável adicional na simulação, enquanto que na prática o tijolo cerâmico é um material poroso.

Vale salientar que para realizar as medidas experimentais era necessário retirar o tijolo de dentro da estufa para efetuar as medições, fazendo com que o ar externo que está mais frio e mais úmido interfira nos dados aferidos. Esta metodologia de medição experimental acarreta imprecisões nos resultados experimentais, sendo uma das causas da discrepância citada.

Os erros médios, os erros relativos, a variância dos quadrados dos resíduos e a correlação de Pearson (Tabela 4-2) mostram uma boa concordância dos dados numéricos com os experimentais, estando o modelo matemático adequado para descrever a transferência de calor.

Tabela 4-2: Parâmetros estatísticos obtidas na análise da transferência de calor.

| T [°C] | E_M [%] | $ERMQ$ [°C ²] | δV^2 [°C ²] | r_p [-] |
|--------|-----------|---------------------------|---------------------------------|-----------|
| 50 | 7 | 400 | 8 | 0,964 |
| 60 | 5 | 200 | 5 | 0,985 |
| 70 | 5 | 429 | 10 | 0,968 |
| 80 | 6 | 665 | 16 | 0,973 |
| 90 | 7 | 715 | 21 | 0,981 |
| 100 | 10 | 2030 | 60 | 0,978 |

4.2.1.2 Cinética de secagem do tijolo

Na secagem experimental do tijolo cerâmico, Silva (2009) mediu a massa de água na amostra para diversos instantes de tempo ao longo do processo. A partir dos resultados numéricos (Anexo D), tomando os valores de massa de água nos mesmos instantes experimentais, comparou-se os dados numéricos (modelo da difusão líquida, Eq. 3.2) com os experimentais para cada condição de secagem, de 50 à 100°C. As Figuras 4.10 a 4,14 ilustram esta comparação. As difusividades mássicas utilizadas nas simulações são abordadas no tópico 4.2.1.3, que trata da estimação dos parâmetros de transporte.

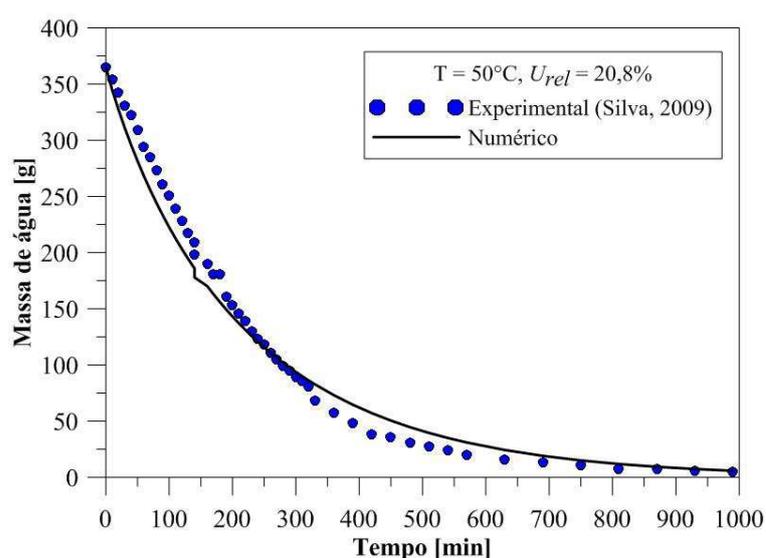


Figura 4.10: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$).

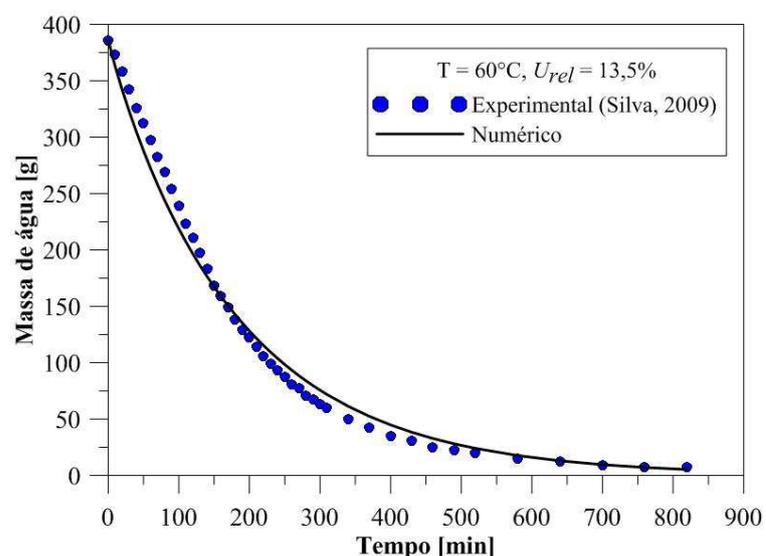


Figura 4.11: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 60^{\circ}\text{C}$).

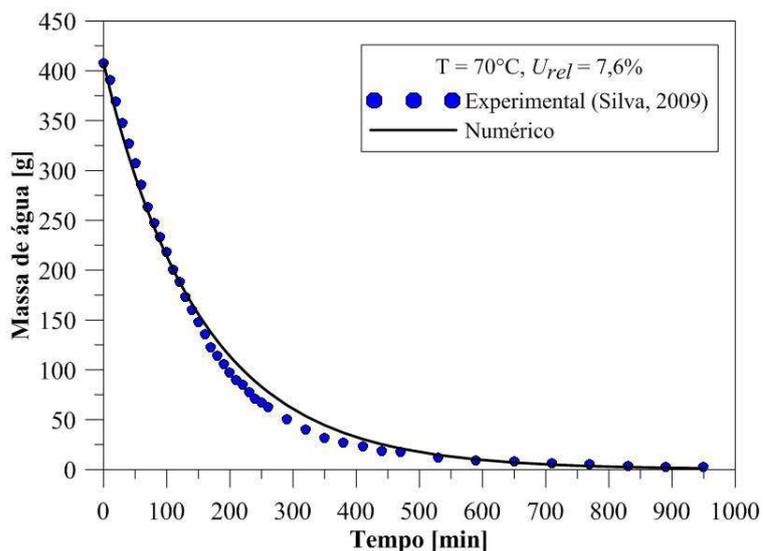


Figura 4.12: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 70^{\circ}\text{C}$).

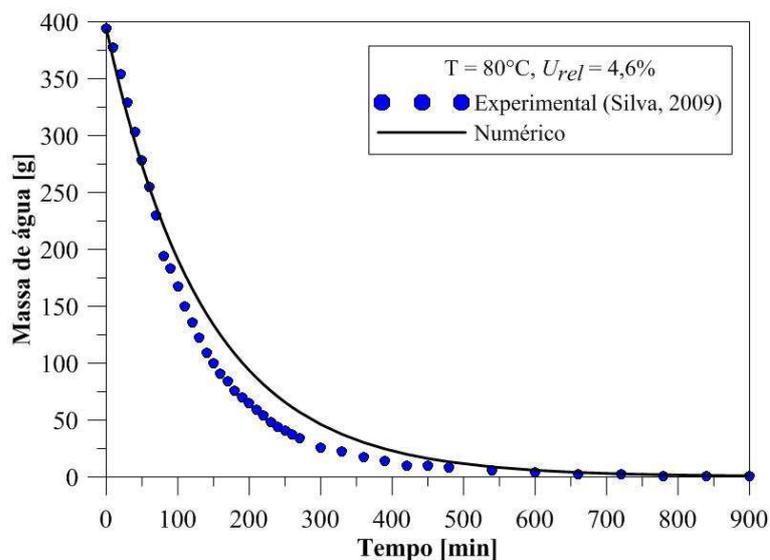


Figura 4.13: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 80^{\circ}\text{C}$).

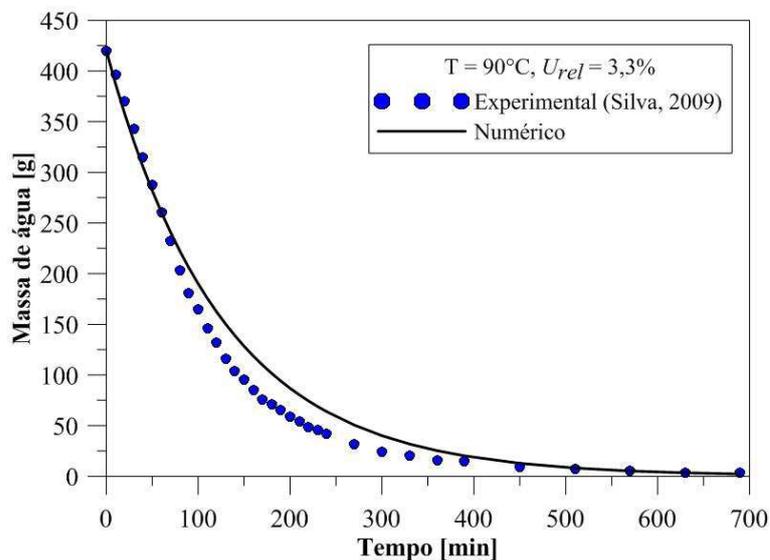


Figura 4.14: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 90^{\circ}\text{C}$).

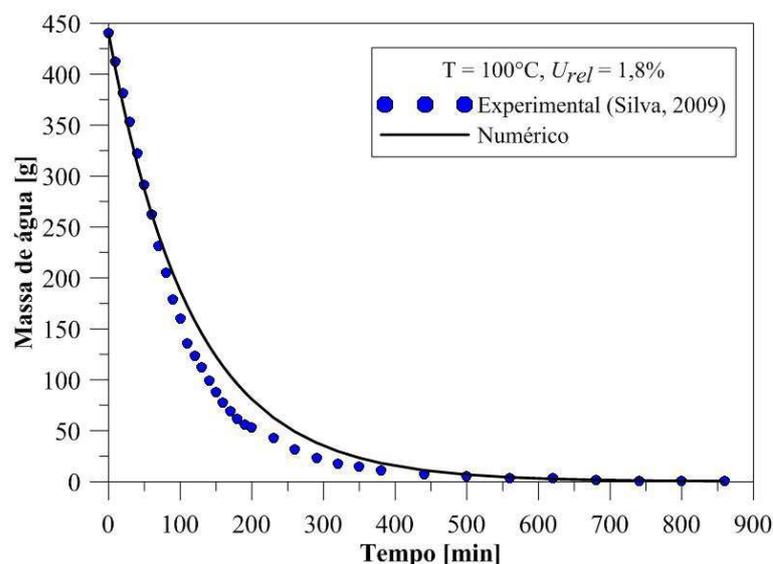


Figura 4.15: Massa de água no interior do tijolo durante o processo de secagem ($T = 100^{\circ}\text{C}$).

Qualitativamente, nota-se que as curvas numéricas ajustam-se bem aos dados experimentais. A avaliação quantitativa é realizada através da análise estatística a partir dos erros médios, dos erros relativos, da variância dos quadrados dos resíduos e da correlação de Pearson (Tabela 4-3). Os dados confirmam a concordância dos dados numéricos com os experimentais, validando assim o modelo matemático proposto nesta pesquisa.

Tabela 4-3: Análise estatística obtida para análise da transferência de massa

| T [$^{\circ}\text{C}$] | E_M [%] | $ERMQ$ [g^2] | δV [g^2] | r_p [-] |
|----------------------------|-----------|-------------------------|-----------------------------|-----------|
| 50 | 18 | 12811 | 267 | 0,999 |
| 60 | 11 | 7222 | 168 | 0,997 |
| 70 | 16 | 4468 | 109 | 0,998 |
| 80 | 39,8 | 18129 | 442 | 0,992 |
| 90 | 29 | 15512 | 456 | 0,993 |
| 100 | 30 | 14869 | 437 | 0,993 |

4.2.1.3 Estimação dos parâmetros de transporte

Os valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção, correspondente a média de toda a superfície do tijolo cerâmico, são fornecidos diretamente pelo *software* CFX[®] a partir dos resultados numéricos (modelo da difusão líquida) e para cada instante de tempo, conforme Anexo C. A condutividade térmica e o calor específico do tijolo foram definidos no tópico 3.2.3.

Realizando uma média aritmética entre os resultados em cada tempo, os valores dos coeficientes para cada temperatura de secagem foram:

- Secagem a 50°C: $h_c = 0,9655 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
- Secagem a 60°C: $h_c = 1,0700 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
- Secagem a 70°C: $h_c = 1,1603 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
- Secagem a 80°C: $h_c = 1,2486 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
- Secagem a 90°C: $h_c = 1,2887 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
- Secagem a 100°C: $h_c = 1,3931 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$

Analisando esses valores verifica-se que são baixos, típicos dos resultados obtidos para fenômenos de convecção natural. Além disso, verifica-se que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção.

Para se obter as difusividades mássicas, foram feitas diversas simulações numéricas, para cada temperatura do ar de secagem. Nesse caso variou-se a difusividade mássica, produzindo diferentes curvas de secagem. Dos resultados obtidos, foram considerados como os valores otimizados das difusividades mássicas, aqueles obtidos das curvas preditas que mais se aproximaram dos dados experimentais.

Os valores das difusividades de massa efetiva (coeficiente de difusão de massa) para cada condição de secagem encontrados foram:

- Secagem a 50°C: $D_{ms} = 1,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Secagem a 60°C: $D_{ms} = 3,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Secagem a 70°C: $D_{ms} = 9,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Secagem a 80°C: $D_{ms} = 24,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Secagem a 90°C: $D_{ms} = 65,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Secagem a 100°C: $D_{ms} = 155,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$;

Comparando os valores da difusividade mássica ajustados com aqueles inicialmente propostos por Silva (2009) (Tabela 3-3), nota-se que as difusividades foram reduzidas em uma escala de 10^{-3} . A redução ocorre pelo fato de se acatar a massa de água em gramas como a umidade do tijolo, diferentemente de Silva (2009) que considerou a umidade da amostra como umidade em base seca, sendo portanto necessário dividir a massa de água/vapor pela massa seca do material.

Tomando os valores das difusividades mássicas no interior do tijolo e aplicando a equação de Arrhenius (Equação 3.19), a qual descreve a dependência do valor da difusividade mássica com a temperatura, observou-se que o logaritmo neperiano da difusividade de massa em função do inverso da temperatura possui um comportamento linear (Figura 4.16). Isto é, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior o coeficiente de difusão de massa (difusividade mássica ou de massa). A equação obtida com um ajuste R^2 de 0,999901 é:

$$\ln(D) = -12215,89593T^{-1} + 21,66999988 \quad (4.1)$$

onde D é dado em m^2/s .

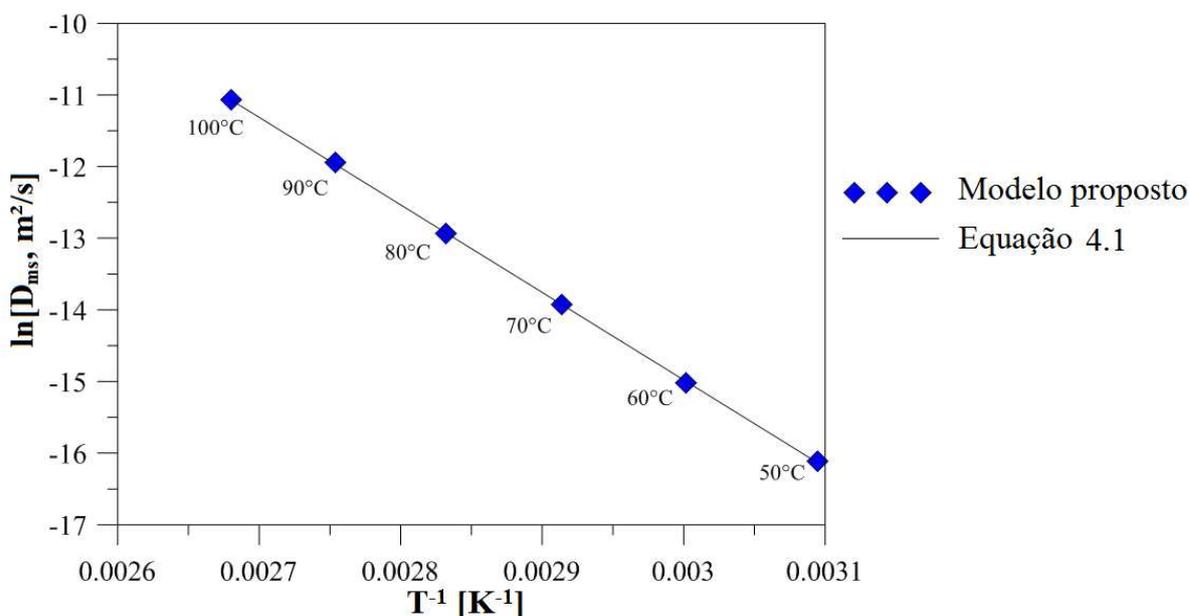


Figura 4.16: Difusividade mássica no tijolo em função do inverso da temperatura.

Comparando a Equação 3.19 que trata da Lei de Arrhenius com a Equação 4.1, que foi calculada a partir de dados numéricos, encontra-se uma energia de ativação (E_a) de valor igual a 101,56 kJ/mol, e um fator de Arrhenius de aproximadamente $2,577 \times 10^9 m^2/s$.

A Lei de Arrhenius é muito utilizada em secagens de materiais agrícolas, mas em se tratando de materiais cerâmicos a escassez de trabalhos utilizando a referida lei é grande. Silva, W. *et al.* (2012) realizaram a secagem experimental de telha cerâmica e aplicaram a Lei de Arrhenius para obter a dependência do coeficiente de transferência de massa convectiva com a temperatura de secagem. A equação forneceu uma energia de ativação de 15,7 kJ/mol.

A diferença entre as duas energias de ativação é justificada por alguns fatores. O tijolo cerâmico tem 19,7 cm de altura, 9,336 cm de largura e 20 cm de comprimento, além de 8 furos em seu interior, enquanto que a telha cerâmica de Silva, W. *et al.* (2012) tem uma média de 4,6 cm de largura, 0,65 cm de altura e 7,7 cm de comprimento, tratando-se de um paralelepípedo maciço poroso. Na secagem do tijolo cerâmico a velocidade do ar de secagem variou de 0,05 m/s ($T = 50^{\circ}\text{C}$) a 0,1 m/s ($T = 100^{\circ}\text{C}$), ao passo que na secagem da telha a velocidade foi de 0,08 m/s nas quatro temperaturas de secagem ($55,6^{\circ}\text{C}$, $69,7^{\circ}\text{C}$, $82,7^{\circ}\text{C}$ e $98,6^{\circ}\text{C}$). A umidade em base seca inicial na secagem do tijolo ficou na média de 0,154, mais baixa que a umidade inicial da telha que foi de 0,24 em base seca para todas as secagens.

Assegurando que a dependência da difusividade com a temperatura obedece a lei exponencial, plotou-se a difusividade de massa em função da temperatura (Figura 4.17) e realizou-se um ajuste de curva usando o *software* Grapher versão 8.0.

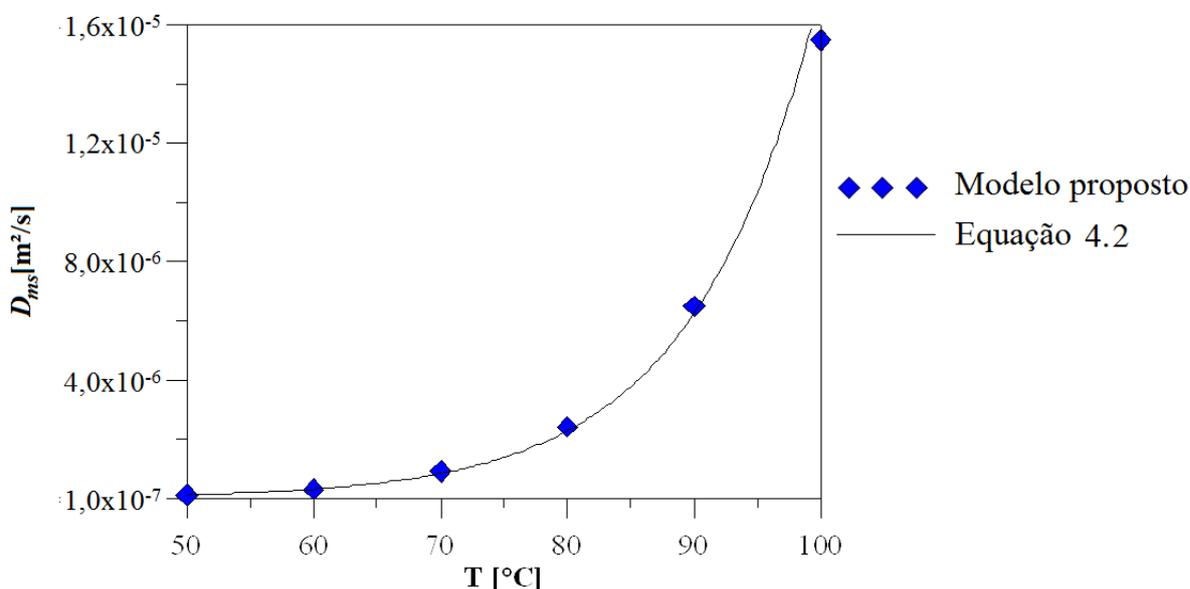


Figura 4.17: Difusividade mássica do tijolo em função da temperatura de secagem.

O ajuste foi encontrando com a curva exponencial dada pela Equação 4.2, obtendo-se um coeficiente de determinação igual a 0,998. A equação é válida para temperaturas na faixa de 50 a 100°C , em que T é dado em graus Celsius.

$$D_{ms} = \text{Exp}(0,101215T) \times 6,903 \times 10^{-10} \quad (4.2)$$

onde D_{ms} é dado em m^2/s .

O uso da Lei de Arrhenius possibilita o cálculo da difusividade mássica para novas temperaturas, desde que estejam entre 50 e 100°C, sem a necessidade de realizar novos experimentos nem novas simulações. Para testar a expressão dada pela Equação 4.2, o valor da difusividade mássica foi calculado para a temperatura de secagem de 75°C. O resultado obtido foi de 14×10^{-7} m²/s, que é maior que a difusividade para a temperatura a 70°C e menor que a difusividade a 80°C. Para uma temperatura de 85°C, por exemplo, encontrou-se uma difusividade mássica de 38×10^{-7} m²/s, que também se encontra entre os valores de 80 a 90°C. Note que ambas as difusividades calculadas estão de acordo com o esperado.

Em cada passo de tempo na simulação numérica foram obtidos os gradientes mássicos nos três eixos cartesianos ($\partial m_x / \partial X$, $\partial m_y / \partial Y$ e $\partial m_z / \partial Z$), além da média geral na superfície (Anexo E). Assim, a resolução da Equação 3.11 forneceu os coeficientes de transferência de massa convectiva para cada tempo e para cada eixo cartesiano. A partir de uma média aritmética desses parâmetros, os valores dos coeficientes de transferência de massa por convecção média foram calculados, conforme expostos na Tabela 4-4.

Avaliando os valores de h_m reportados na Tabela 4-4, verificou-se que o aumento da temperatura do ar de secagem provoca uma diminuição no valor deste parâmetro. A diferença entre os valores dos coeficientes encontrados para cada coordenada cartesiana está diretamente ligada à posição do tijolo cerâmico em relação à direção de escoamento do ar de secagem.

Tabela 4-4: Análise coeficientes de transferência de massa convectiva

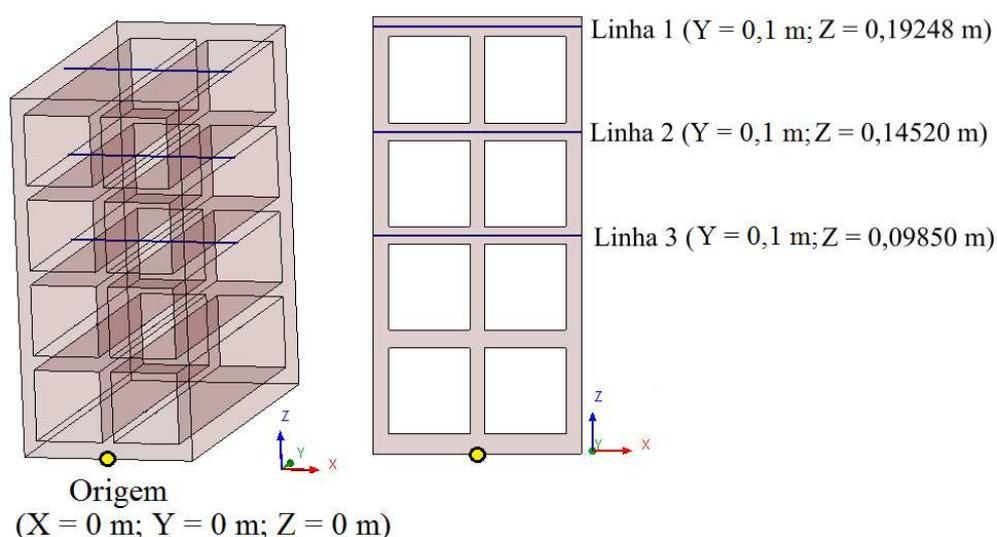
| T [°C] | $ h_{m,x} $ [m/s] | $ h_{m,y} $ [m/s] | $ h_{m,z} $ [m/s] | $ h_m $ [m/s] |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 50 | $6,87 \times 10^{-5}$ | $5,95 \times 10^{-7}$ | $1,82 \times 10^{-6}$ | $8,38 \times 10^{-4}$ |
| 60 | $4,50 \times 10^{-5}$ | $4,22 \times 10^{-7}$ | $4,56 \times 10^{-7}$ | $4,78 \times 10^{-4}$ |
| 70 | $4,78 \times 10^{-5}$ | $4,87 \times 10^{-7}$ | $1,08 \times 10^{-7}$ | $4,83 \times 10^{-4}$ |
| 80 | $5,10 \times 10^{-5}$ | $5,46 \times 10^{-7}$ | $1,11 \times 10^{-7}$ | $5,07 \times 10^{-4}$ |
| 90 | $5,41 \times 10^{-5}$ | $6,00 \times 10^{-7}$ | $2,33 \times 10^{-7}$ | $5,31 \times 10^{-4}$ |
| 100 | $5,89 \times 10^{-5}$ | $6,65 \times 10^{-7}$ | $2,86 \times 10^{-7}$ | $5,71 \times 10^{-4}$ |

4.2.2 Perfis de temperatura e teor de umidade no tijolo

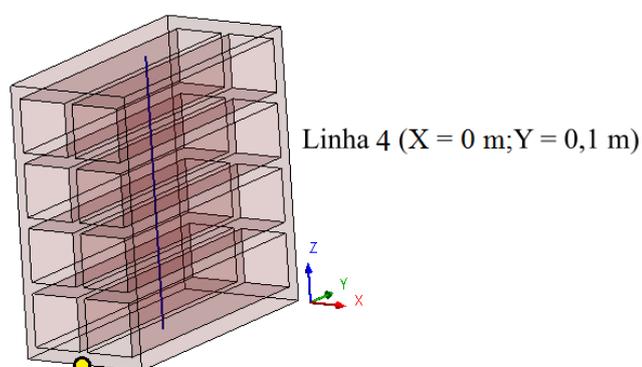
A distribuição da temperatura e do teor de umidade no interior do tijolo ao longo da secagem não possui simetria lateral, pois o ar de secagem flui da direita para a esquerda. Essa não-simetria só é possível de observar devido à inserção do efeito do meio externo (ar)

na simulação numérica. Como não foi considerada a bandeja onde a amostra é depositada no interior da estufa, há uma simetria da parte superior com a parte inferior, que é melhor visualizada a partir dos campos de temperatura e de umidade que serão exibidos posteriormente. Para avaliar os perfis de temperatura e do teor de umidade foram inseridas linhas no domínio sólido (Figura 4.18).

No domínio sólido foram inseridas três linhas horizontais (Figura 4.18a), com a primeira mais acima (Linha 1), a segunda um pouco abaixo da primeira (Linha 2) e a terceira no centro do tijolo (Linha 3). Devido à simetria da parte superior com a inferior, considerou-se desnecessário plotar linhas abaixo da terceira linha. Foi inserida também uma linha vertical (Figura 4.18b). As linhas horizontais e verticais estão localizadas no centro do tijolo.



(a)



(b)

Figura 4.18: Linhas de análise no domínio sólido (a) horizontais e (b) vertical

Sobre todas as linhas foram plotados os valores da temperatura e teor de umidade para os instantes de tempo de 10 minutos após o início da secagem, 60 minutos e no tempo final de processo para cada experimento.

4.2.2.1 Curva de temperatura no interior do tijolo

As curvas de temperatura nas linhas horizontais (Figura 4.18a) para a secagem a 50°C estão expostas nas Figuras 4.19 a 4.21, para os instantes de 10, 60 e 990 minutos de secagem. Observa-se que, no início do processo, os gradientes de temperatura no interior do sólido são menos acentuados, contudo cresce com o tempo, para, a partir de um certo instante do processo, voltar a decrescer. Note que no instante de 10 minutos, a variação entre a temperatura máxima e a mínima observadas é de aproximadamente 0,50°C para a Linha 2. Após uma hora de processo, essa variação de temperatura aumentou para aproximadamente 1,35°C ainda na mesma linha. Próximo à condição de equilíbrio térmico (990 minutos), a diferença de temperatura decresceu para 0,21°C.

Uma assimetria é observada nas curvas sobre as linhas 1 a 3 em todos os instantes de tempo. Como o fluxo de ar ocorre da direita para a esquerda, o lado direito do tijolo apresenta valores mais altos de temperatura ao longo de todo o processo em comparação com o lado esquerdo. As assimetrias são melhor visualizadas nos instantes de 10 e de 60 minutos de secagem devido ao fato de nesses tempos as variações de temperatura mostrarem os maiores valores.

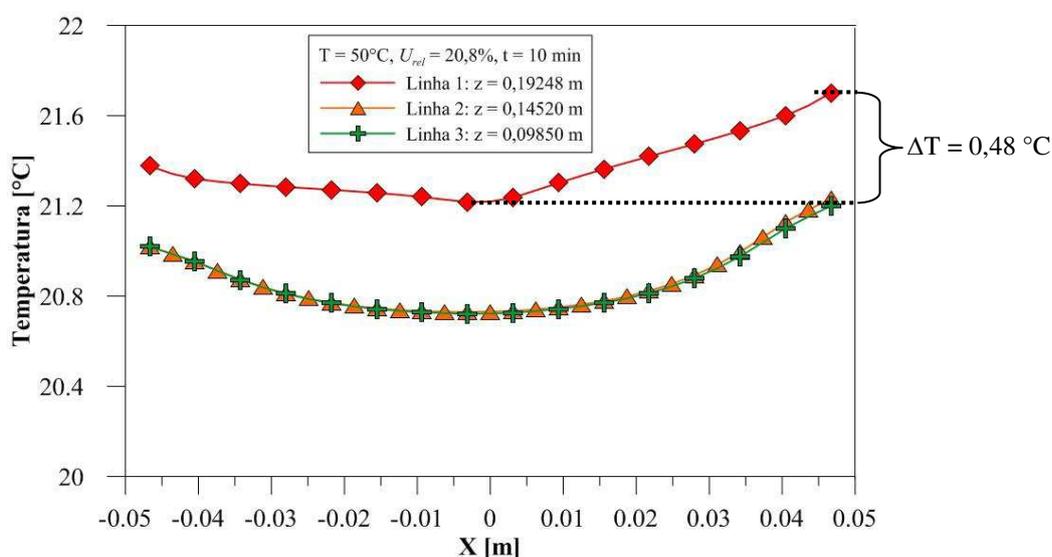


Figura 4.19: Temperatura no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 50°C.

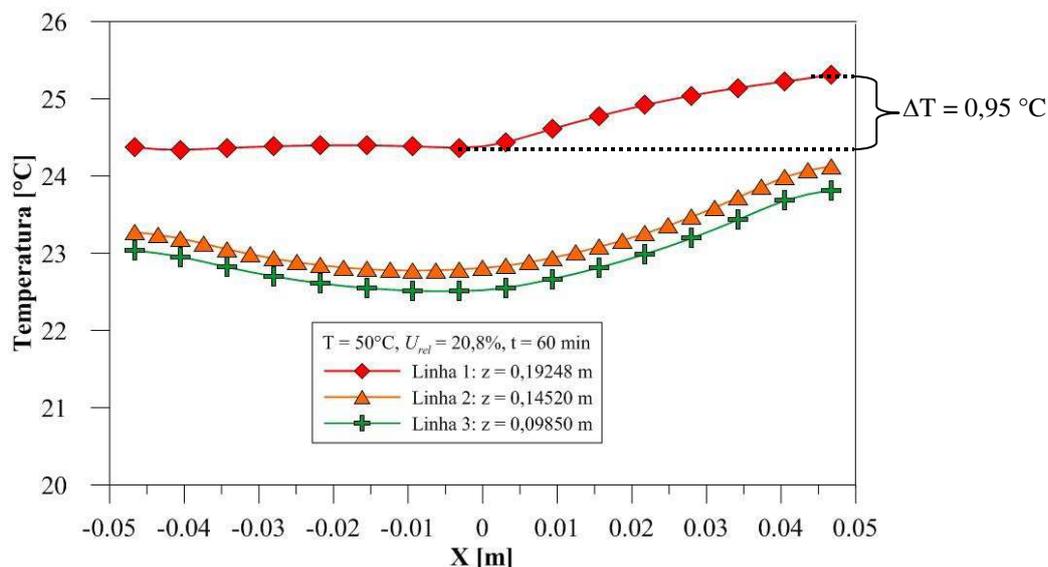


Figura 4.20: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 50°C .

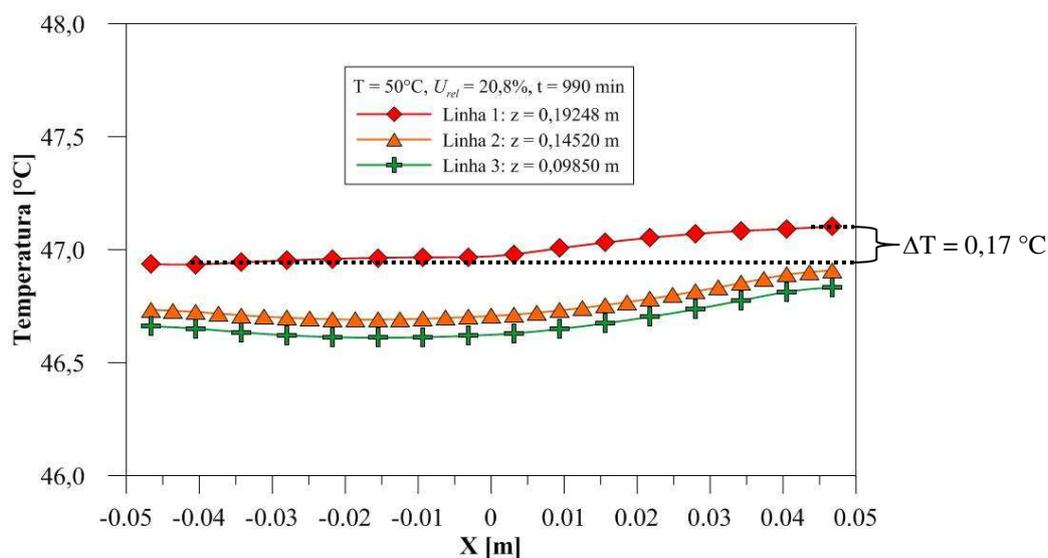


Figura 4.21: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 990 min de secagem a 50°C .

Traçando o perfil de temperatura sobre a linha 4 (Figura 4.18b) para os instantes de 10, 60 e 990 minutos de secagem, observa-se inicialmente um ΔT que cresce aos 60 minutos e torna a decrescer no final da secagem. Nota-se uma simetria devido à ausência da prateleira em que o tijolo descansa durante o processo de secagem no interior da estufa, isto é, se a prateleira tivesse inserida na simulação numérica, uma assimetria também seria observada.

Para se ter uma visualização melhor das variações de temperatura no interior do tijolo para as secagens em todas as temperaturas, nas Tabelas 4-5 à 4-8 resumiu-se as variações de temperatura encontradas nas Linhas horizontais 1, 2, 3 e vertical 4, respectivamente.

Os demais gráficos relativos às secagens à 60°C (Figuras 4.23 a 4.26), à 70°C (Figuras 4.27 a 4.30), à 80°C (Figuras 4.31 a 4.34), à 90°C (Figuras 4.35 a 4.38) e à 100°C (Figuras 4.39 a 4.42) são expostos.

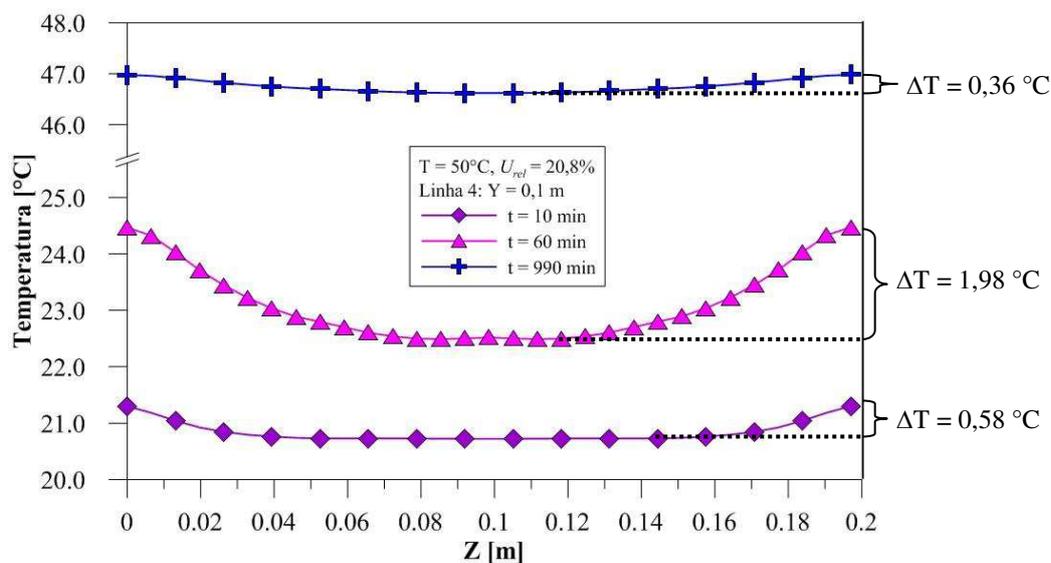


Figura 4.22: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 990 min de secagem a 50°C.

Tabela 4-5: Variações de temperatura máxima na Linha 1

| | $\Delta T_{\text{máx}} [^{\circ}\text{C}]$ | | |
|-----|--|--------|--------------------|
| | 10 min | 60 min | Tempo final |
| 50 | 0,48 | 0,95 | 0,17 (t = 990 min) |
| 60 | 0,75 | 1,49 | 0,31 (t = 820 min) |
| 70 | 0,93 | 1,83 | 0,23 (t = 950 min) |
| 80 | 1,32 | 2,61 | 0,33 (t = 900 min) |
| 90 | 1,64 | 3,28 | 0,66 (t = 990 min) |
| 100 | 1,95 | 3,66 | 0,39 (t = 860 min) |

Tabela 4-6: Variações de temperatura máxima na Linha 2

| | $\Delta T_{\text{máx}} [^{\circ}\text{C}]$ | | |
|-----|--|--------|--------------------|
| | 10 min | 60 min | Tempo final |
| 50 | 0,50 | 1,35 | 0,21 (t = 990 min) |
| 60 | 0,77 | 2,03 | 0,40 (t = 820 min) |
| 70 | 0,95 | 2,47 | 0,29 (t = 950 min) |
| 80 | 1,38 | 3,55 | 0,41 (t = 900 min) |
| 90 | 1,74 | 4,43 | 0,85 (t = 990 min) |
| 100 | 1,97 | 4,98 | 0,50 (t = 860 min) |

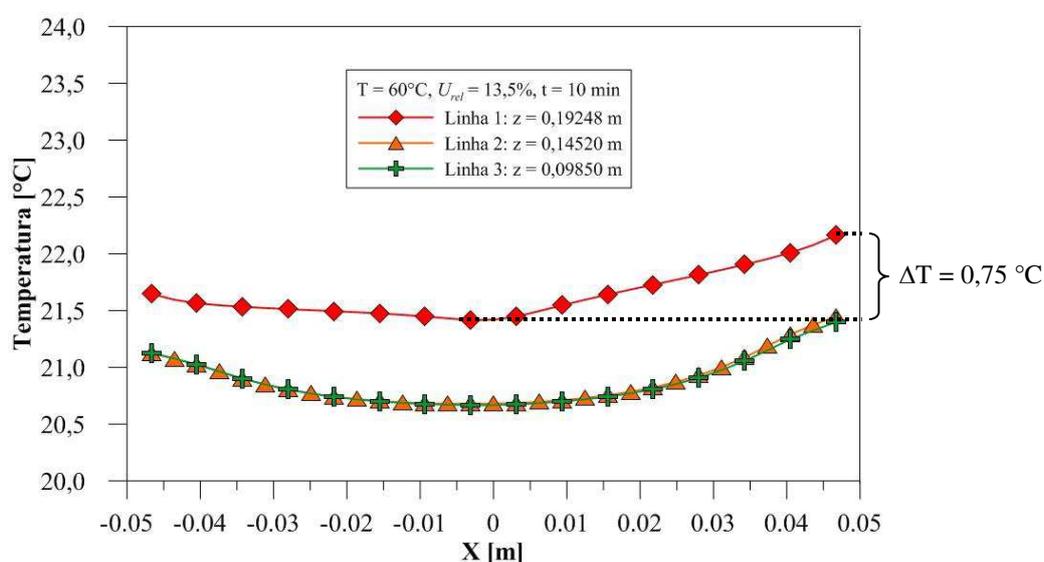
Tabela 4-7: Variações de temperatura máxima na Linha 3

| | $\Delta T_{\text{máx}} [^{\circ}\text{C}]$ | | |
|-----|--|--------|--------------------|
| | 10 min | 60 min | Tempo final |
| 50 | 0,48 | 1,31 | 0,22 (t = 990 min) |
| 60 | 0,72 | 1,97 | 0,41 (t = 820 min) |
| 70 | 0,90 | 2,40 | 0,30 (t = 950 min) |
| 80 | 1,31 | 3,43 | 0,42 (t = 900 min) |
| 90 | 1,65 | 4,29 | 0,86 (t = 990 min) |
| 100 | 1,88 | 4,83 | 0,51 (t = 860 min) |

Tabela 4-8: Variações de temperatura máxima na Linha 4

| | $\Delta T_{\text{máx}} [^{\circ}\text{C}]$ | | |
|-----|--|--------|--------------------|
| | 10 min | 60 min | Tempo final |
| 50 | 0,58 | 1,98 | 0,36 (t = 990 min) |
| 60 | 0,86 | 2,95 | 0,65 (t = 820 min) |
| 70 | 1,05 | 3,57 | 0,48 (t = 950 min) |
| 80 | 1,54 | 5,13 | 0,68 (t = 900 min) |
| 90 | 1,93 | 6,37 | 1,39 (t = 990 min) |
| 100 | 2,17 | 7,18 | 0,83 (t = 860 min) |

Comparando as linhas 1, 2 e 3, percebe-se que as maiores variações de temperatura ocorrem na linha 2, sendo, portanto, essa região a mais propensa a sofrer trincas e deformações.

**Figura 4.23:** Temperaturas no interior do tijolo ao longo das linhas horizontais após 10 minutos de secagem a 60°C.

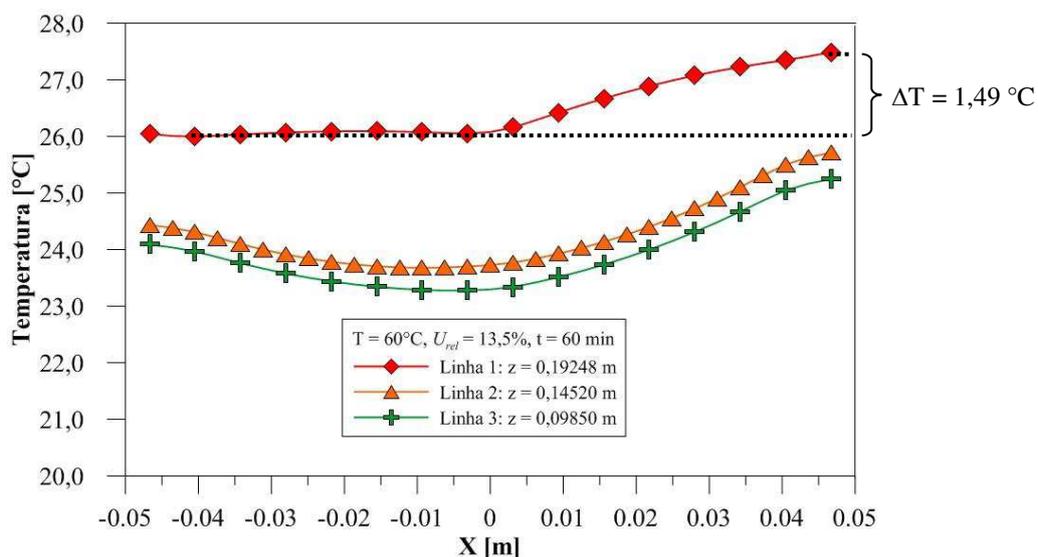


Figura 4.24: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 60°C.

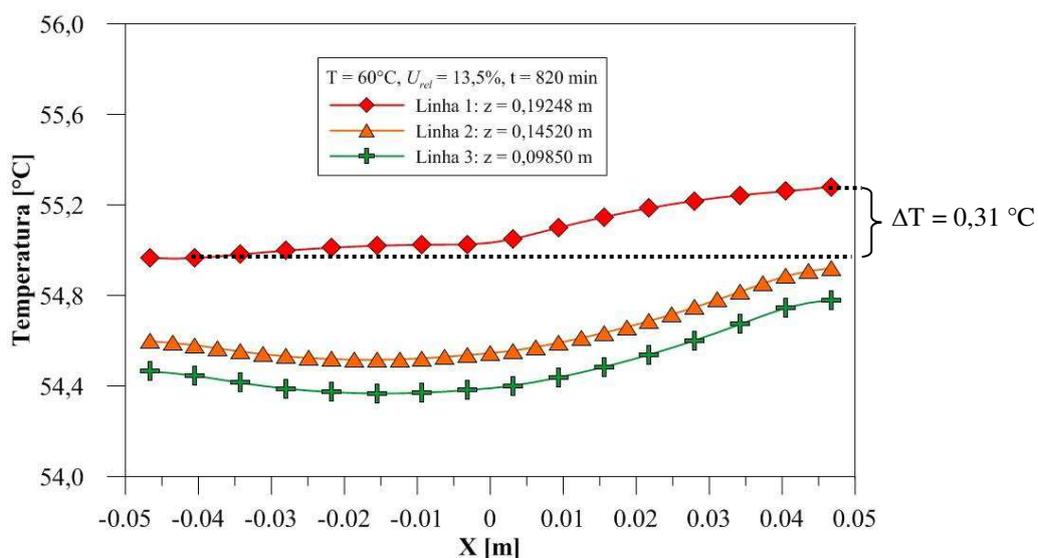


Figura 4.25: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 820 min de secagem a 60°C.

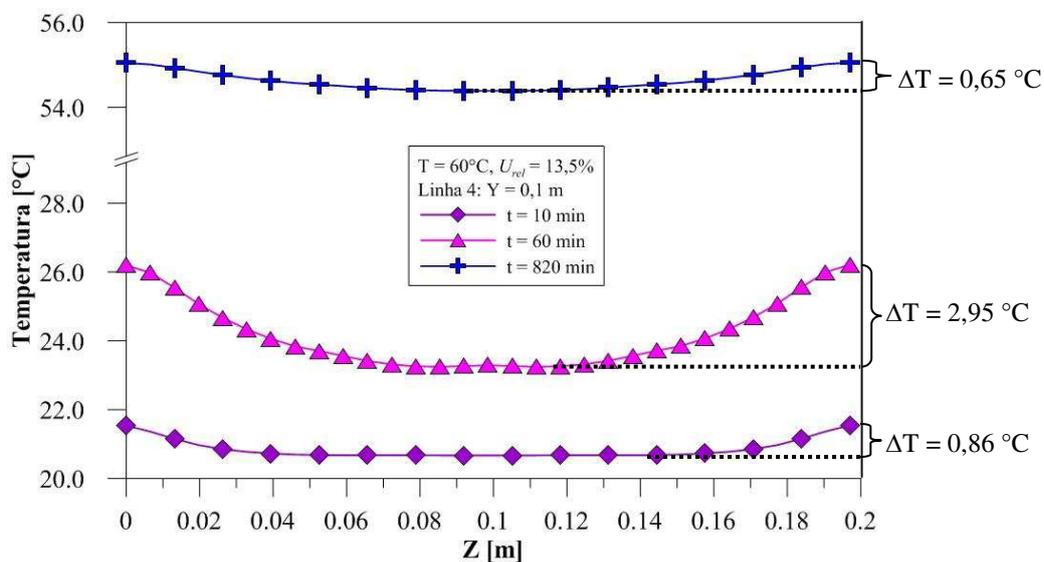


Figura 4.26: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 820 min de secagem a 60°C.

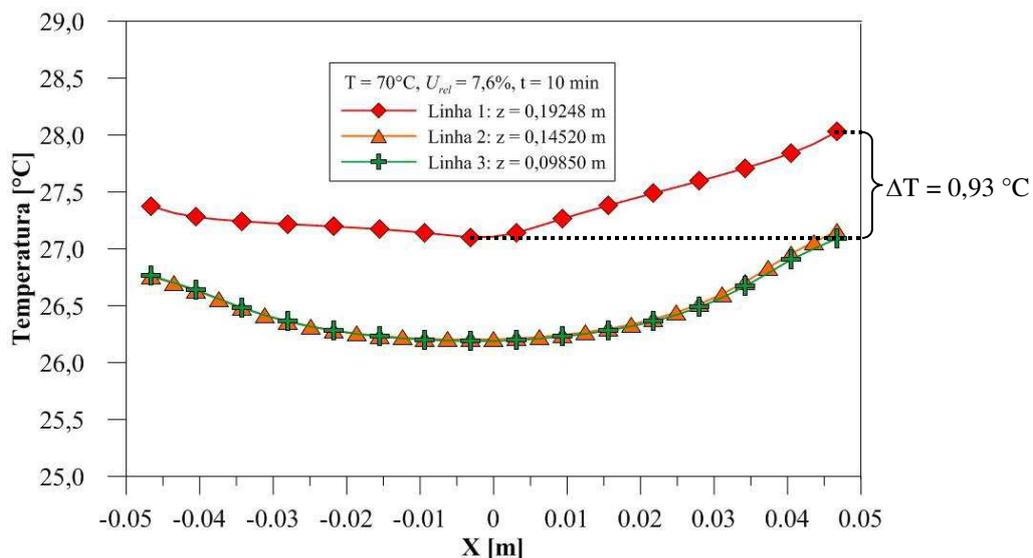


Figura 4.27: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 70°C.

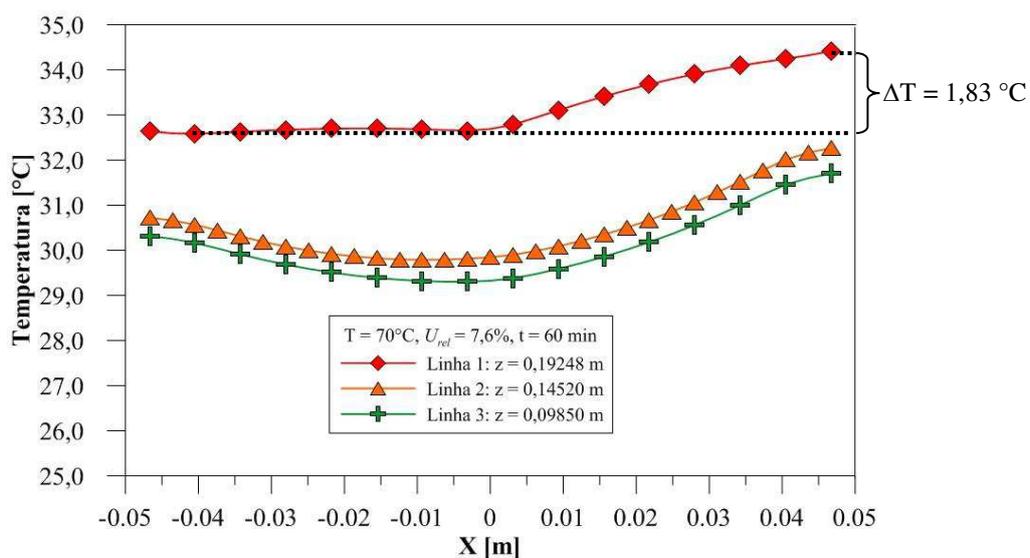


Figura 4.28: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 70°C.

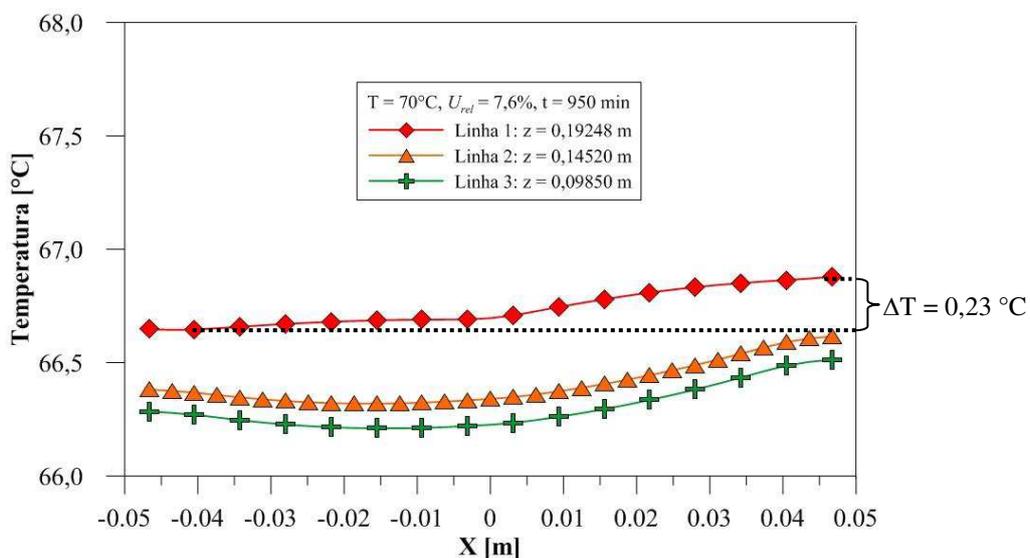


Figura 4.29: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 950 min de secagem a 70°C.

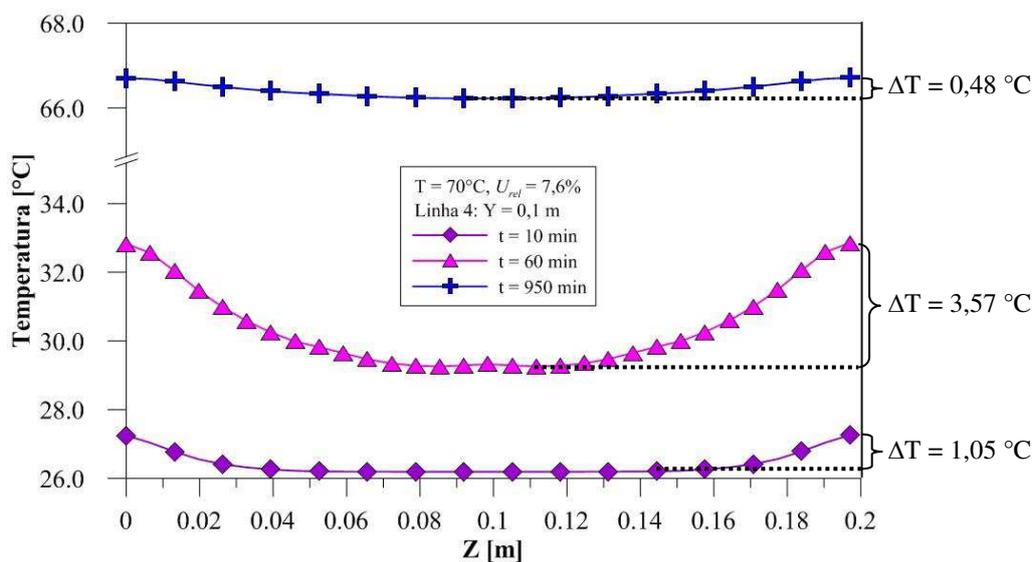


Figura 4.30: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 950 min de secagem a 70°C .

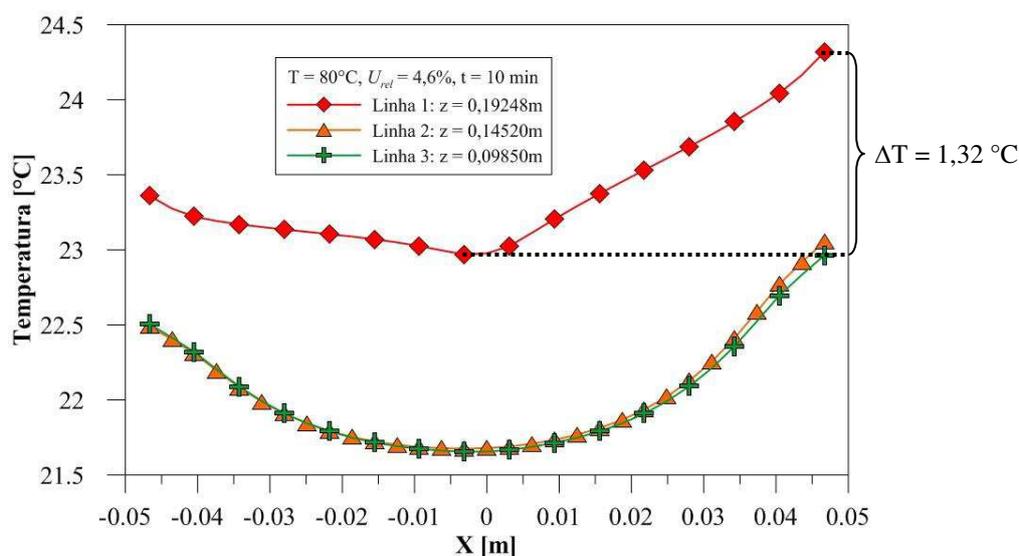


Figura 4.31: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 80°C .

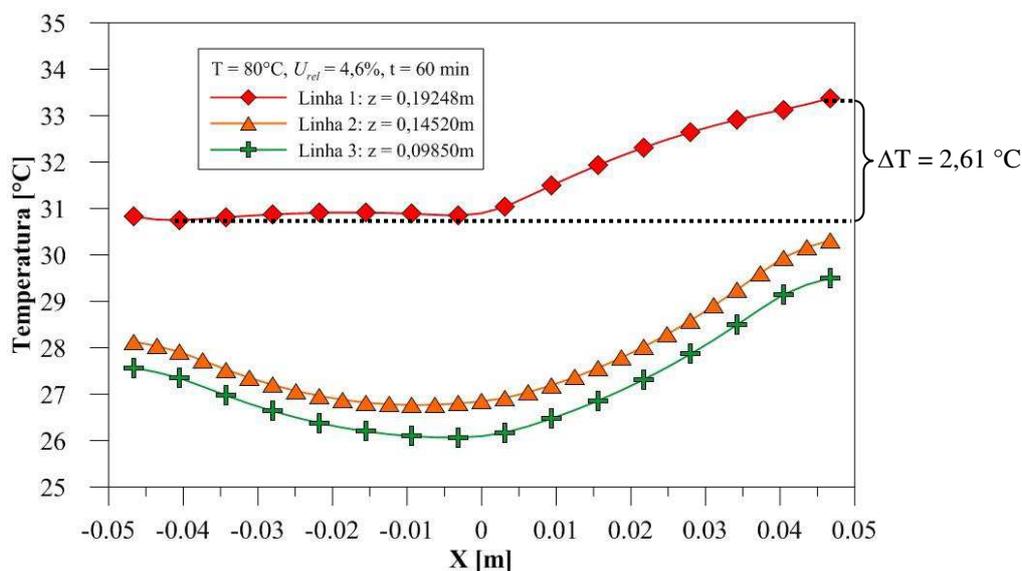


Figura 4.32: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 80°C .

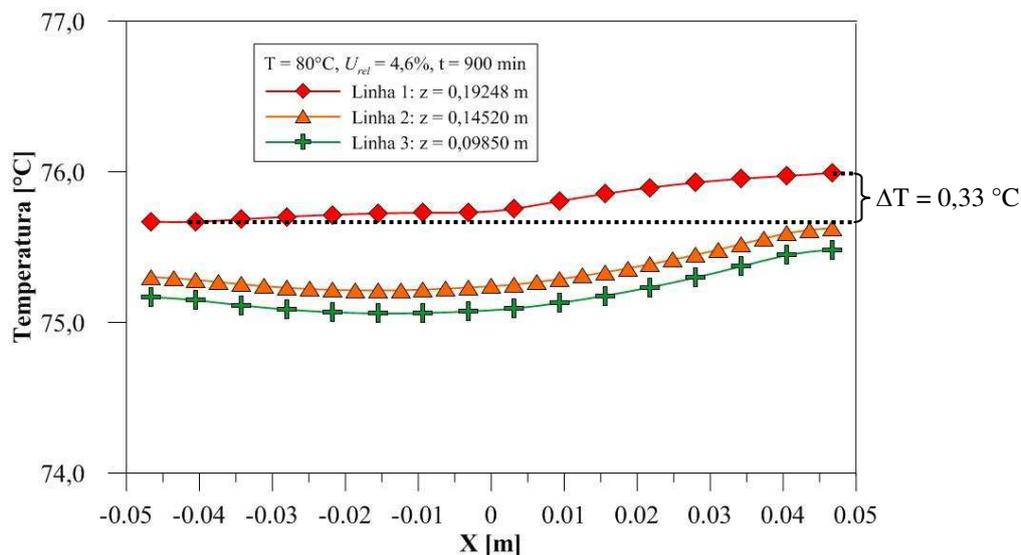


Figura 4.33: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 900 min de secagem a 80°C .

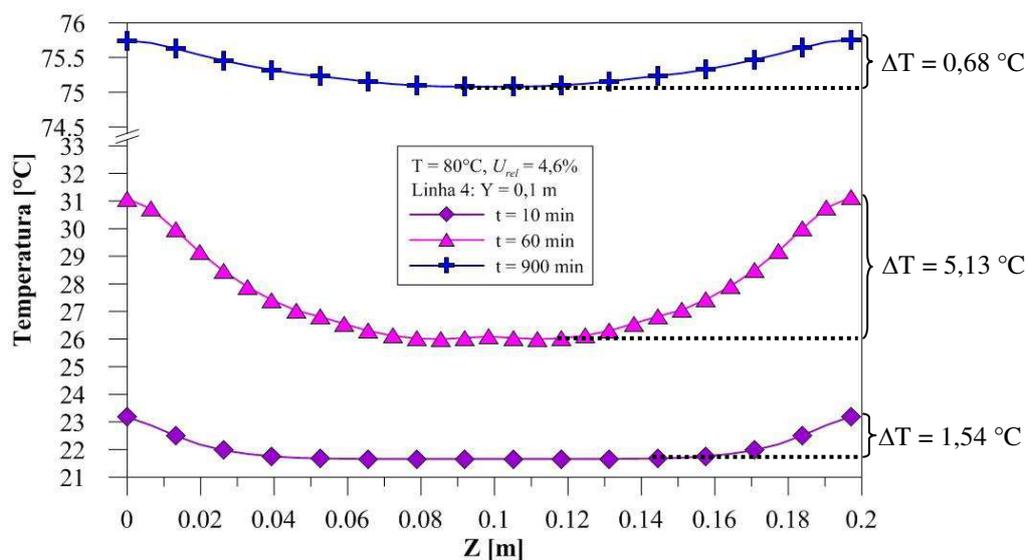


Figura 4.34: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 990 min de secagem a 80°C .

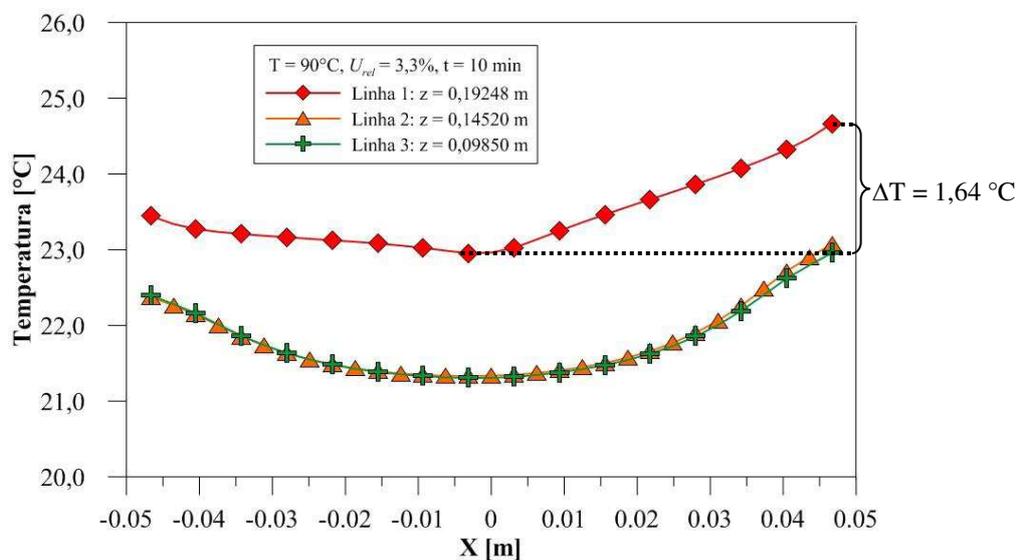


Figura 4.35: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 90°C .

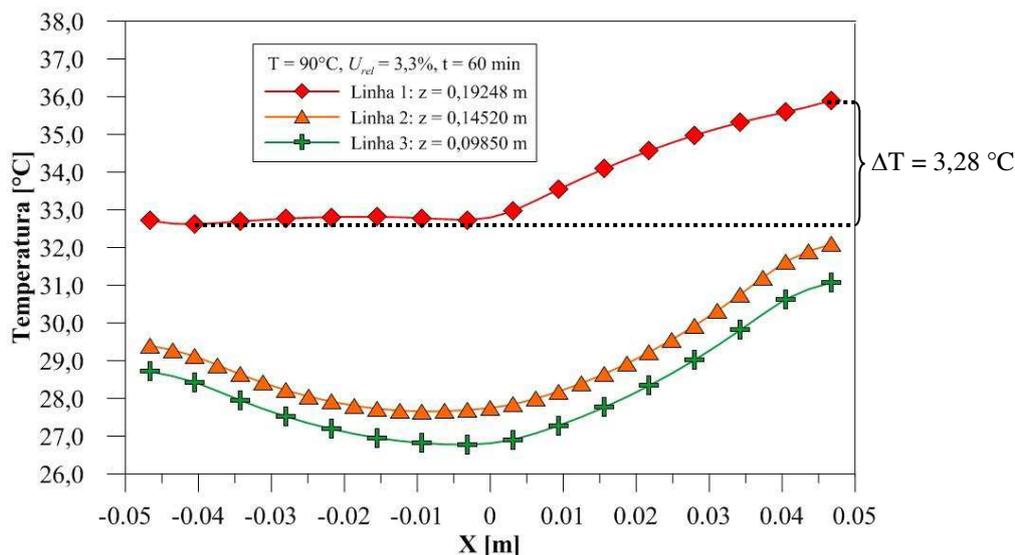


Figura 4.36: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 90°C.

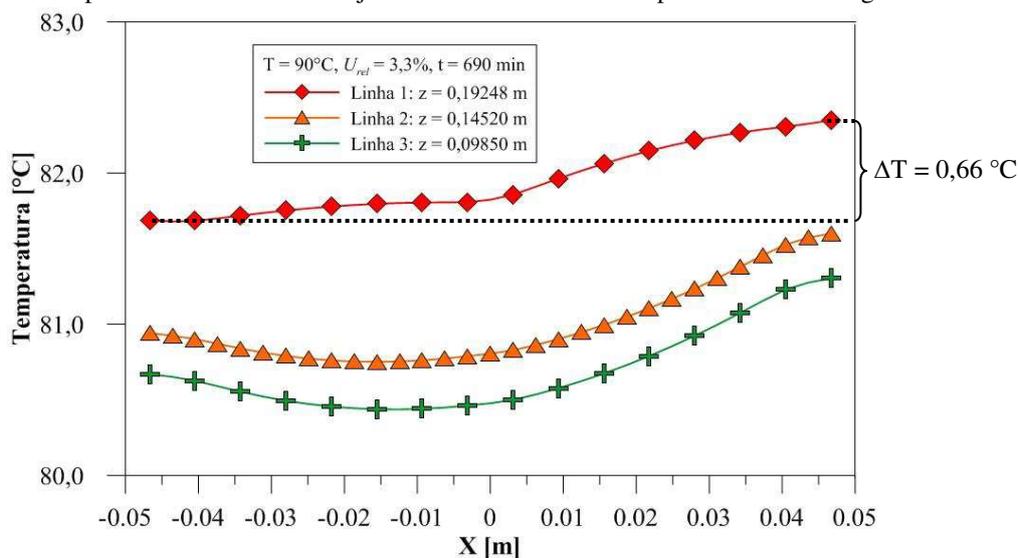


Figura 4.37: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 690 min de secagem a 90°C.

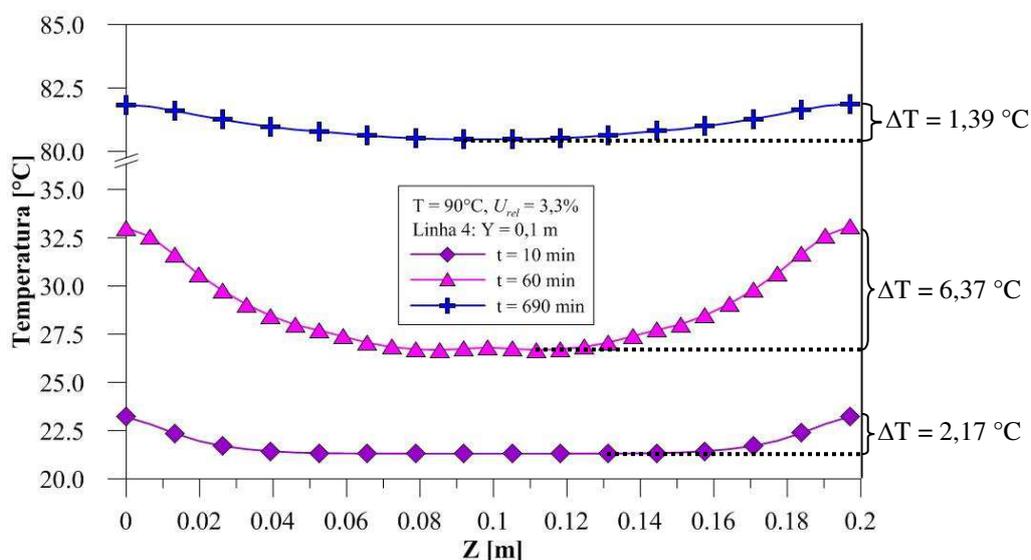


Figura 4.38: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 690 min de secagem a 90°C.

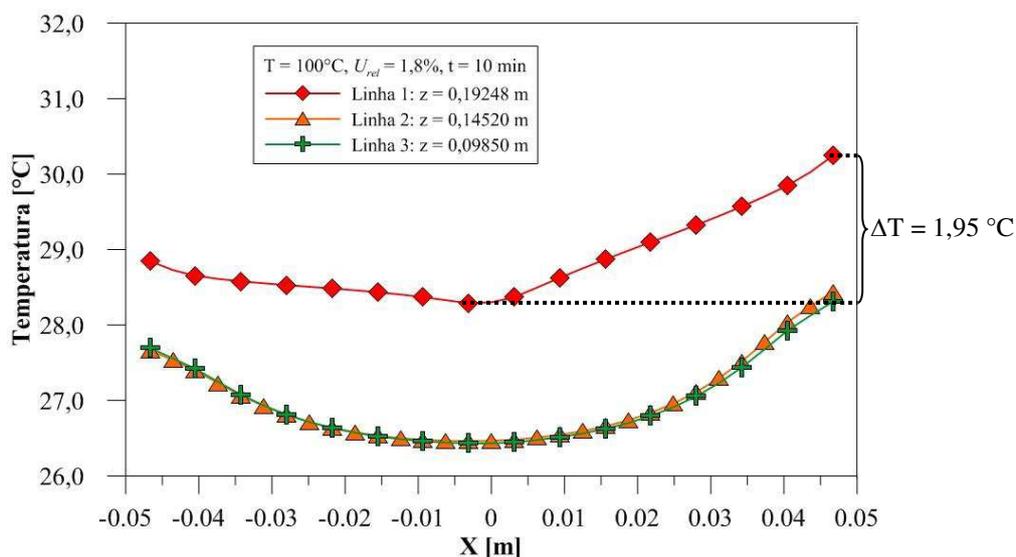


Figura 4.39: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 100°C .

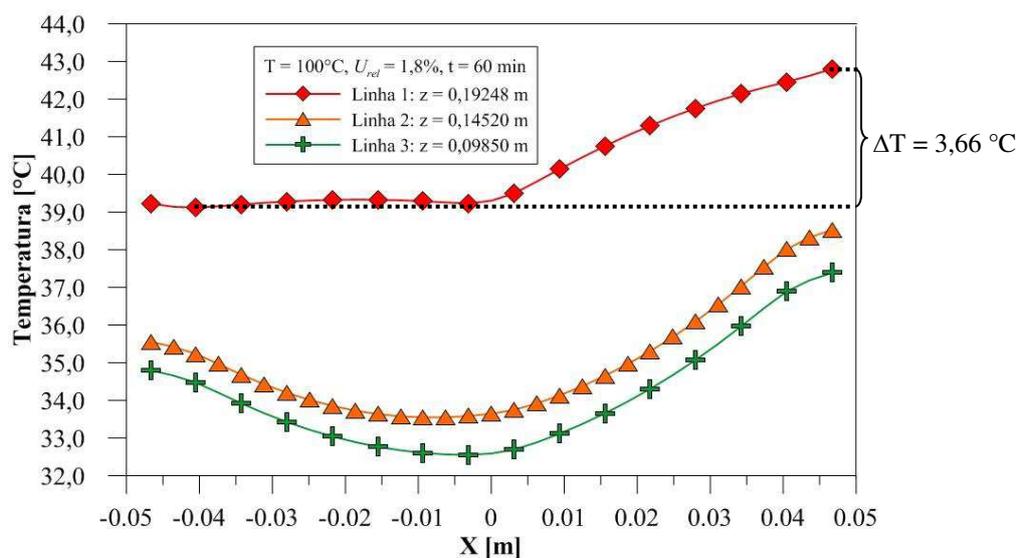


Figura 4.40: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 100°C .

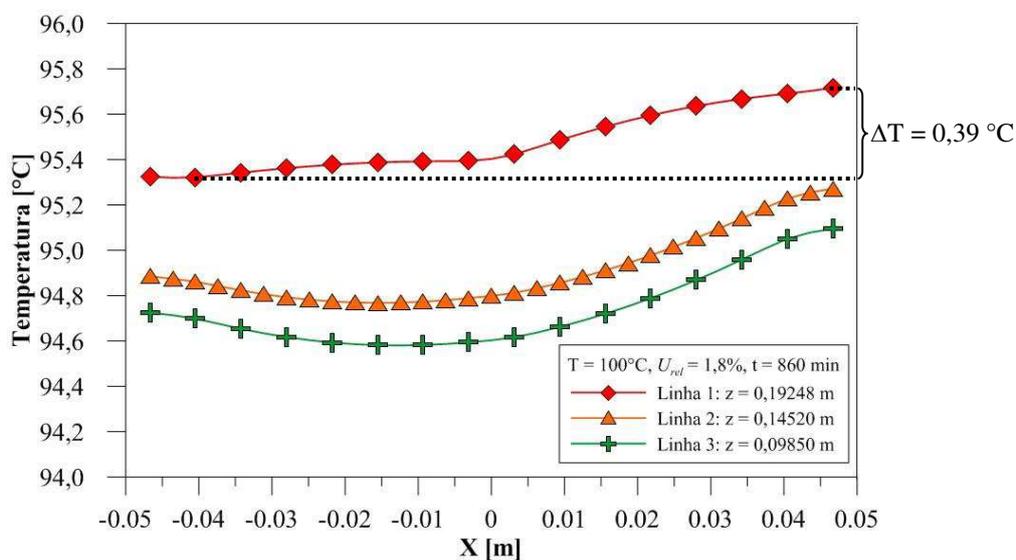


Figura 4.41: Temperaturas no interior do tijolo nas linhas horizontais após 860 min de secagem a 100°C .

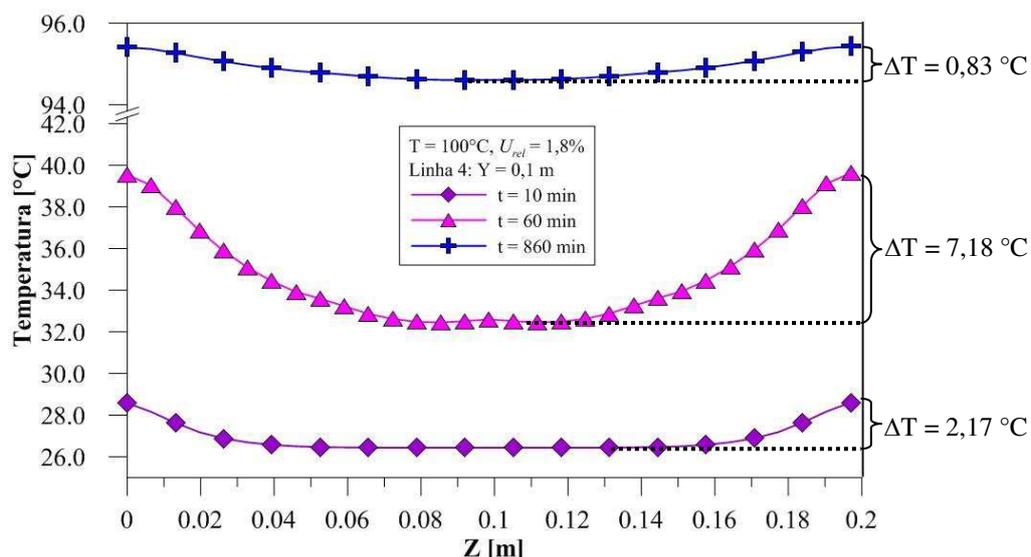


Figura 4.42: Temperaturas no interior do tijolo sobre a Linha 4 aos 10, 60 e 860 min de secagem a 100°C.

4.2.2.2 Curvas do teor de umidade no interior do tijolo

Em geral os trabalhos que estudam a secagem abordam o fenômeno a partir do teor de umidade em base seca. Desta forma, sobre as linhas descritas na Figura 4.18, foram obtidos os dados da massa de água e, juntamente com a massa seca do tijolo, foi determinado o teor de umidade em base seca locais.

Nas Figuras 4.43 a 4.46 estão ilustrados os perfis do teor de umidade ao longo das linhas 1 à 3 (horizontais) e 4 (vertical). Para os instantes de tempo de 10 min, 60 min e final do processo de secagem, calculou-se as variações do teor de umidade a partir da diferença entre o maior e o menor valor de umidade ao longo de cada linha. Observa-se nas secagens que as variações do teor de umidade crescem entres os instantes de 10 minutos e 60 minutos, e apresentam um valor bem pequeno no tempo final da secagem.

No instante de 10 minutos, a variação observada foi de $10,7 \times 10^{-3}$ g/g. Após uma hora de processo, a variação aumentou para aproximadamente $21,4 \times 10^{-3}$ g/g. Próximo à condição de equilíbrio térmico (990 minutos), a variação decresceu para $61,7 \times 10^{-5}$ g/g.

Os demais gráficos relativos às secagens à 60°C (Figuras 4.47 a 4.50), à 70°C (Figuras 4.51 a 4.54), à 80°C (Figuras 4.55 a 4.58), à 90°C (Figuras 4.59 a 4.62) e à 100°C (Figuras 4.63 a 4.66) são apresentados em sequência.

As causas discutidas na seção 4.2.2.1 acerca das assimetrias observadas são válidas também para as curvas de secagem. Note que o lado direito do tijolo apresenta teores de umidade bem reduzido em comparação com o lado esquerdo do material ao longo do processo de secagem. Por outro lado, para a linha 4 observa-se uma total simetria.

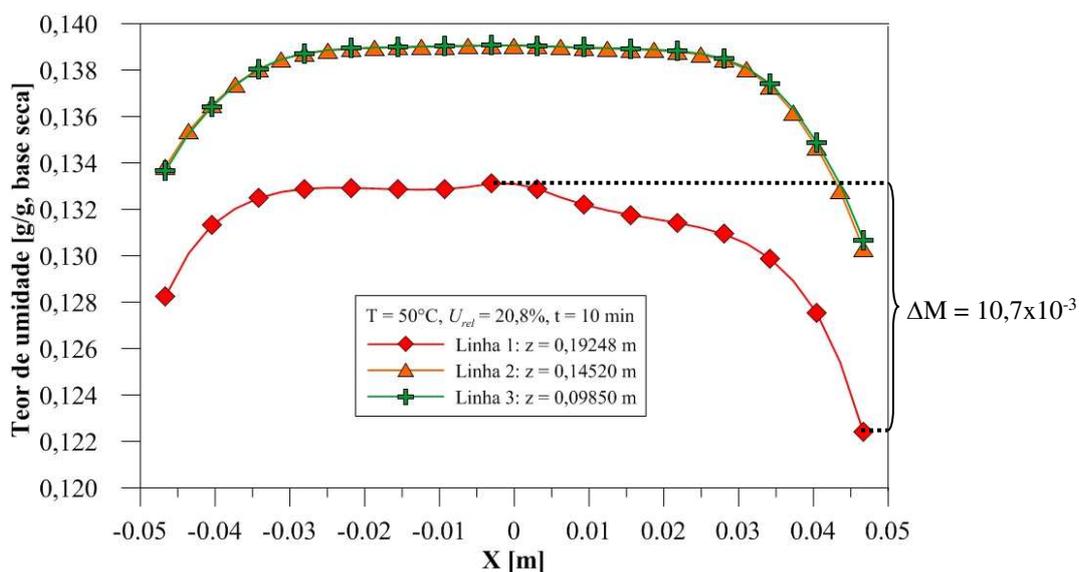


Figura 4.43: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 50°C.

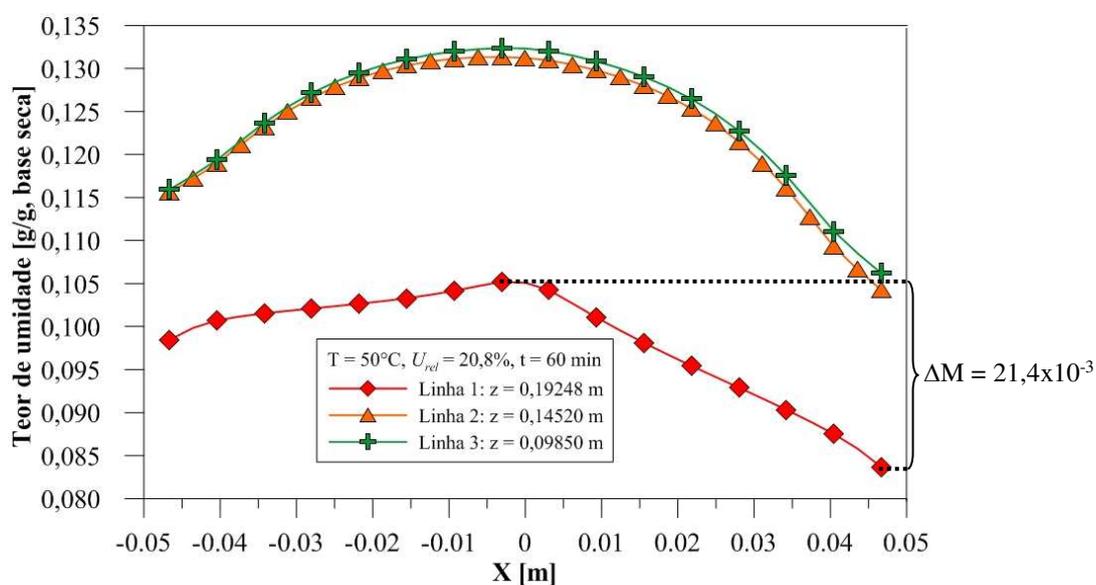


Figura 4.44: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 50°C.

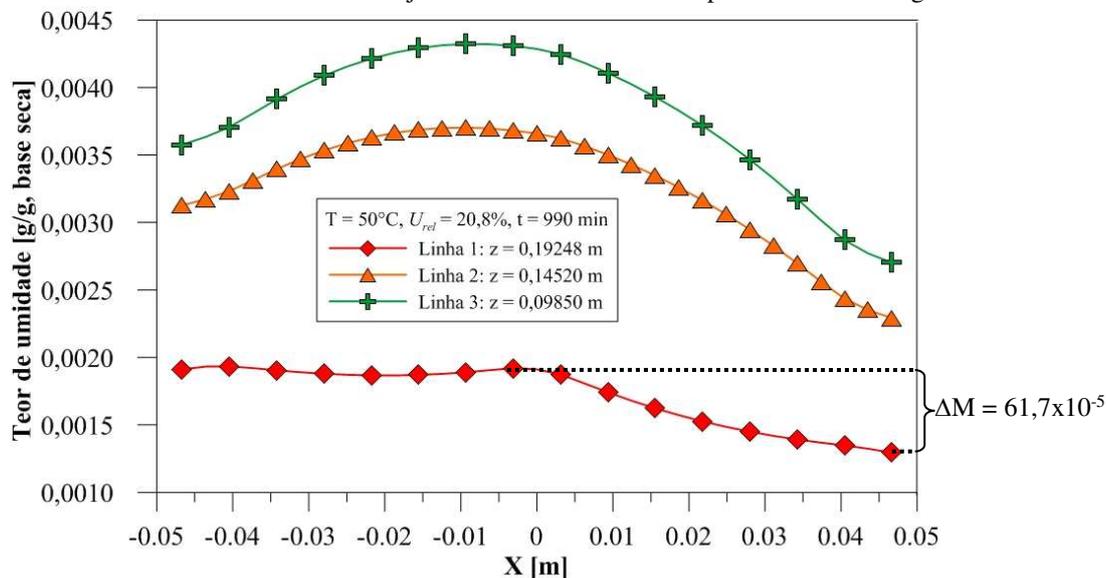


Figura 4.45: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 990 min de secagem a 50°C.

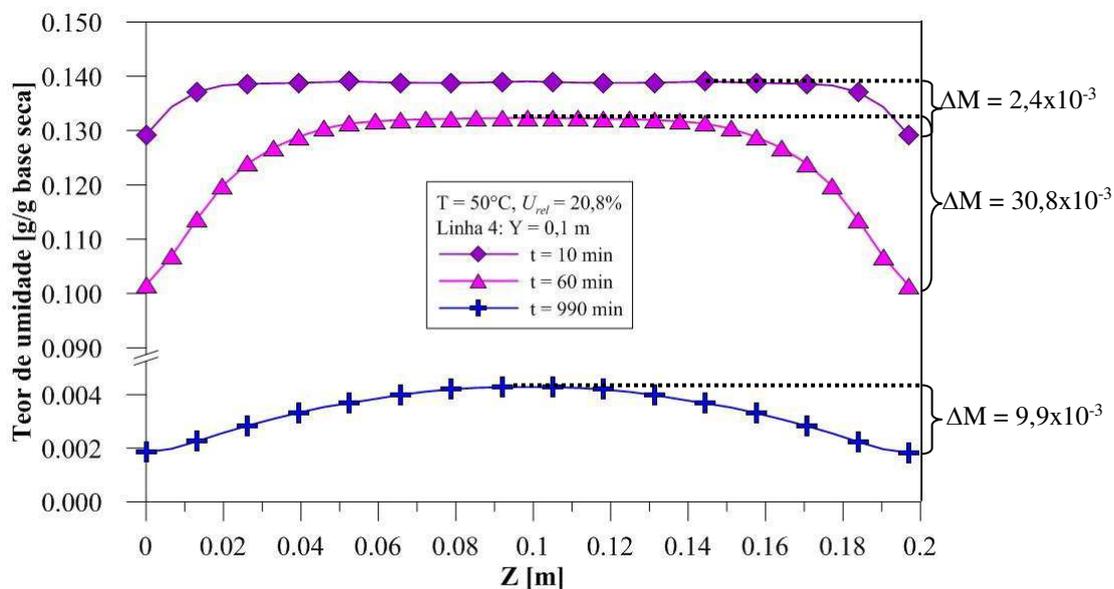


Figura 4.46: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 990 min de secagem a 50°C

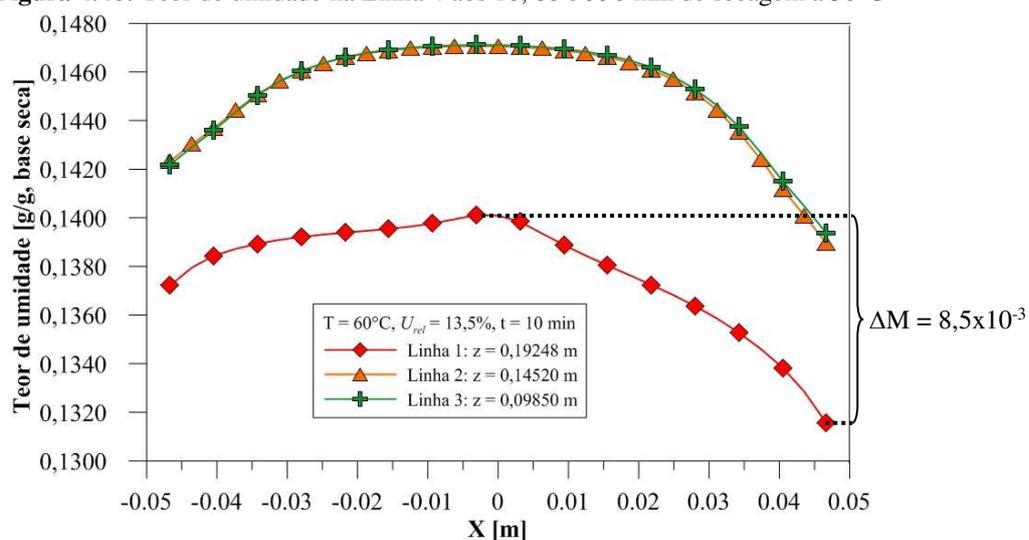


Figura 4.47: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 60°C.

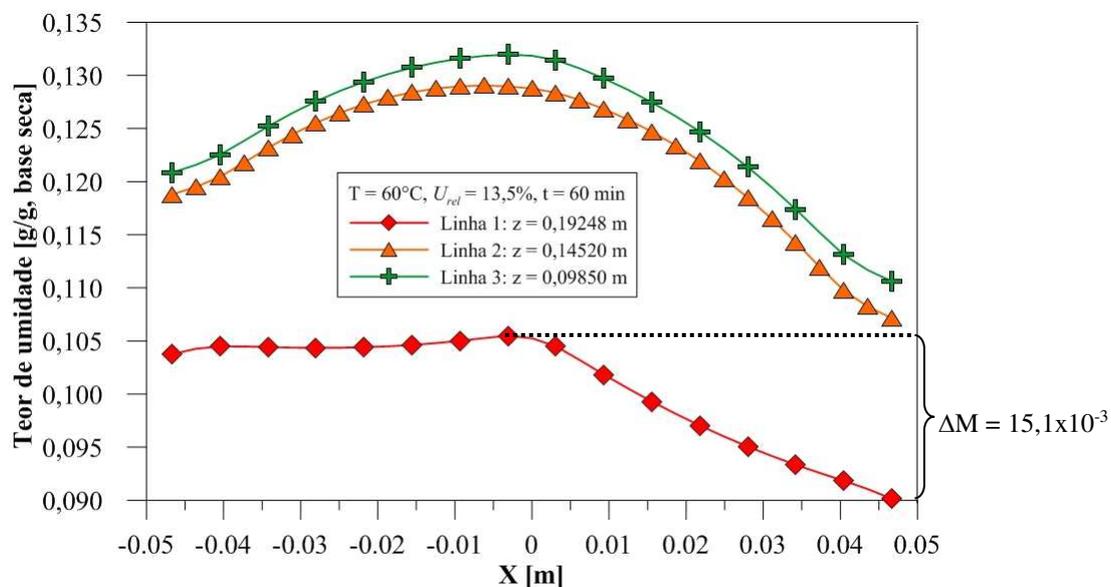


Figura 4.48: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 60°C.

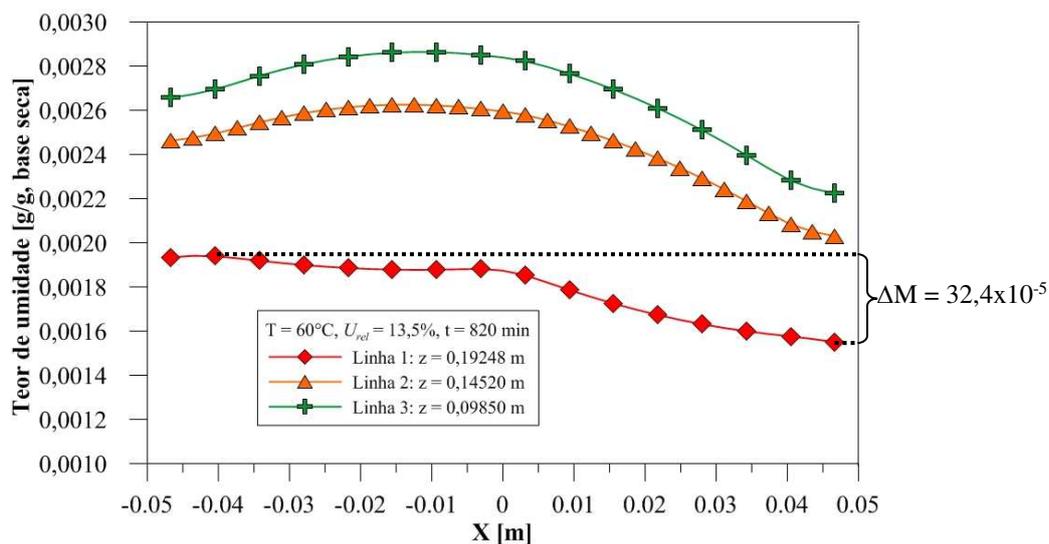


Figura 4.49: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 820 min de secagem a 60°C.

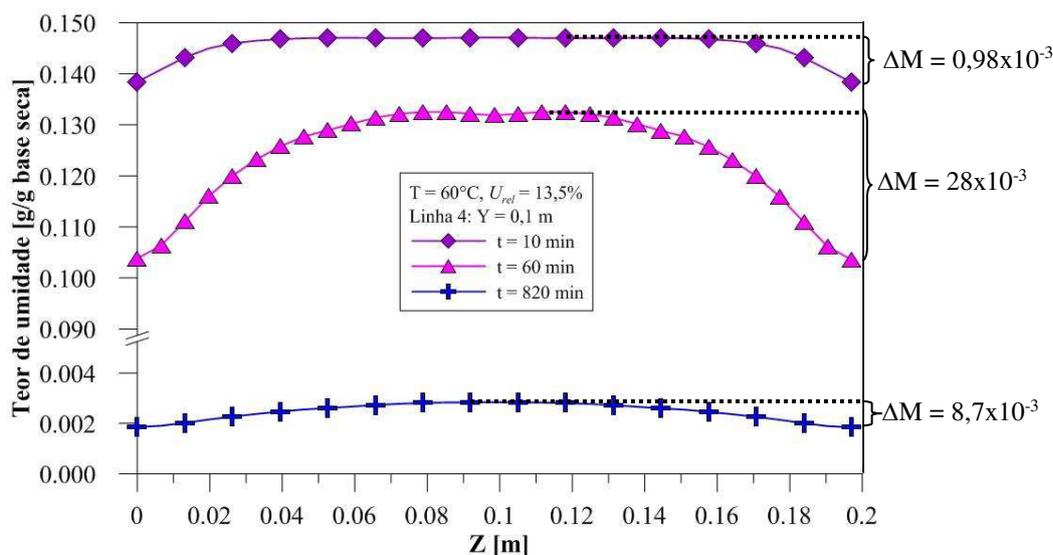


Figura 4.50: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 820 minutos de secagem a 60°C.

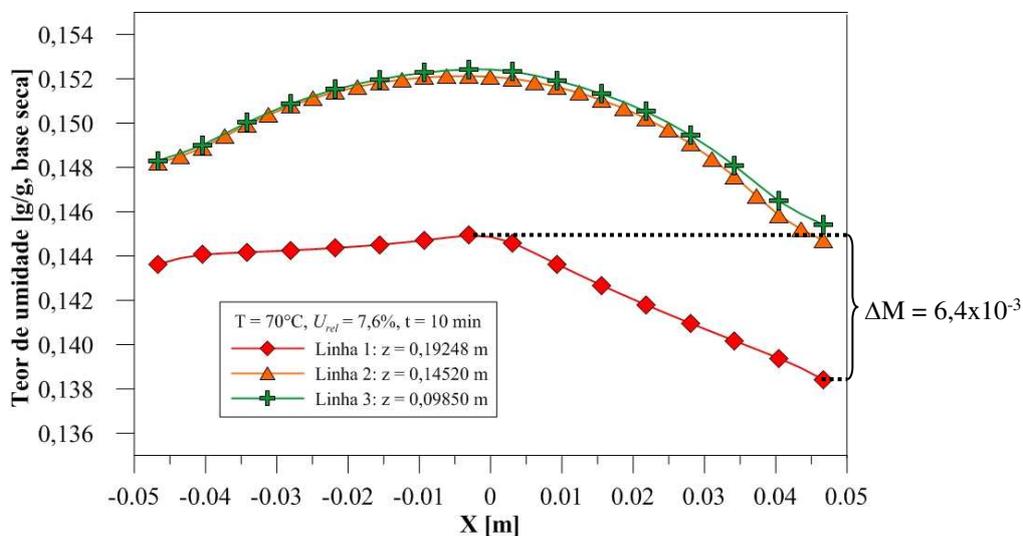


Figura 4.51: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 70°C.

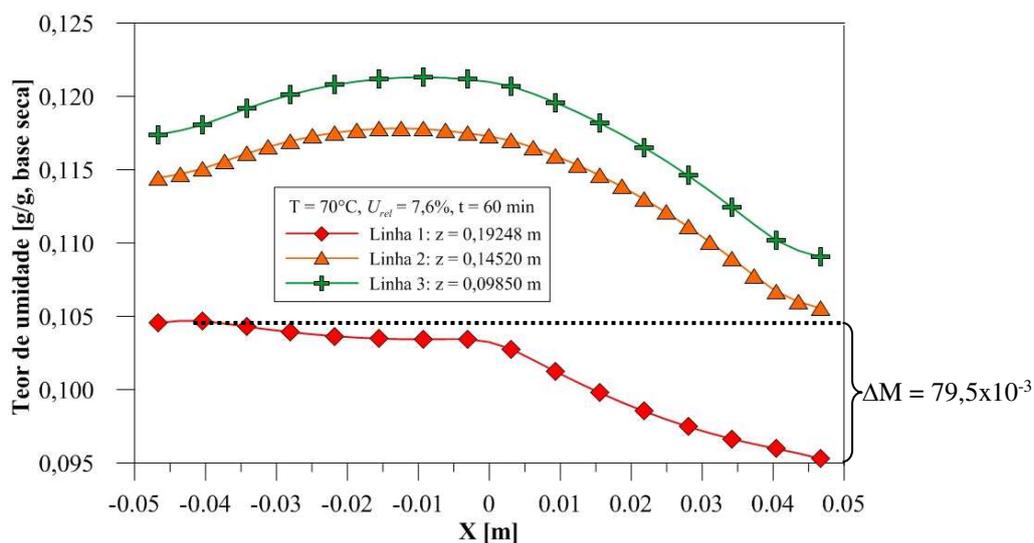


Figura 4.52: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 70°C .

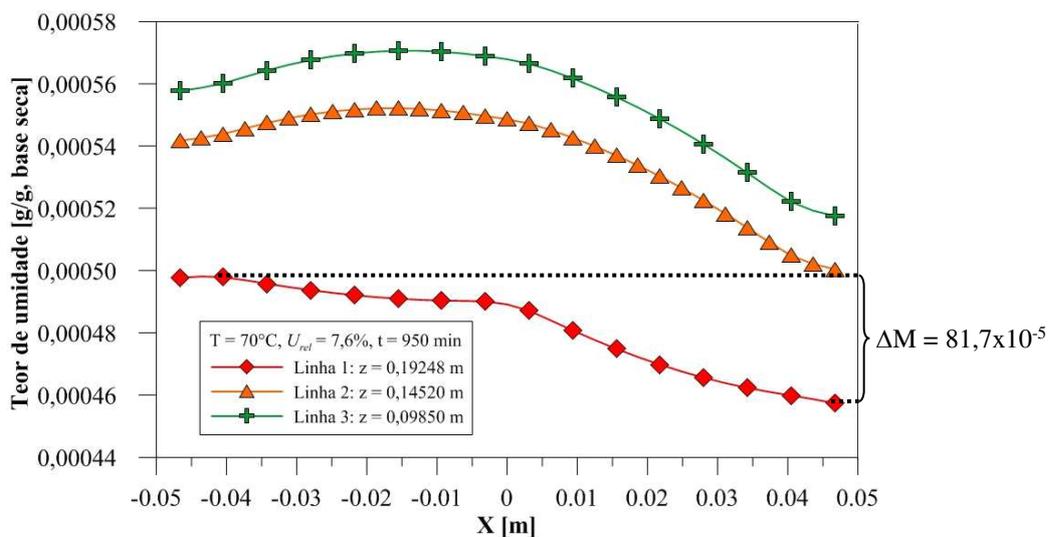


Figura 4.53: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 950 min de secagem a 70°C .

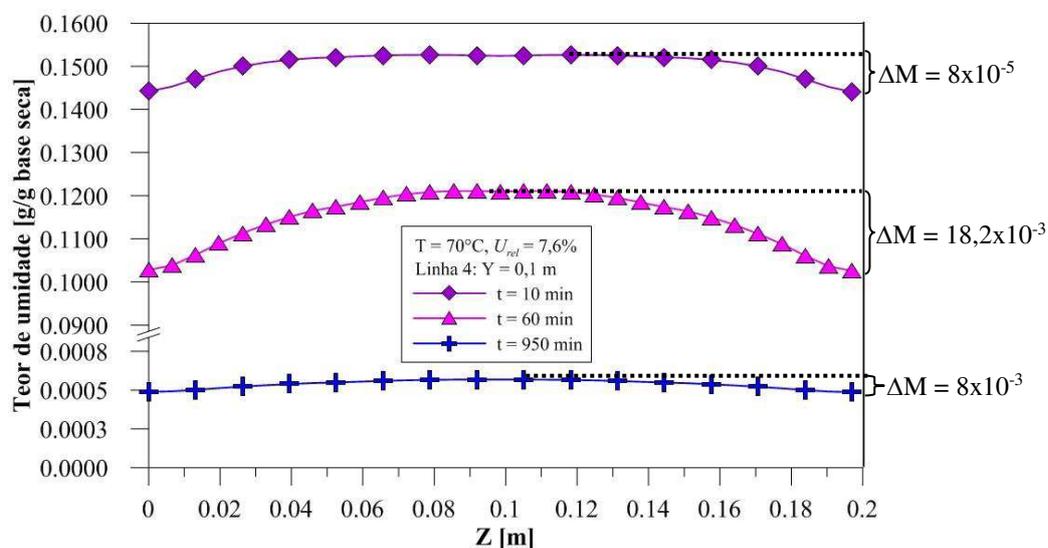


Figura 4.54: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 950 minutos de secagem a 70°C .

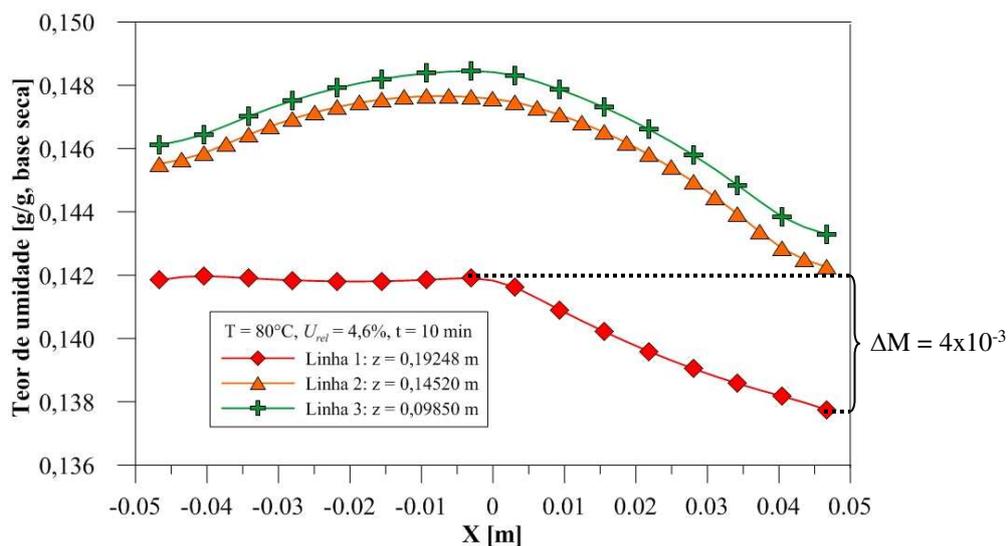


Figura 4.55: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 80°C.

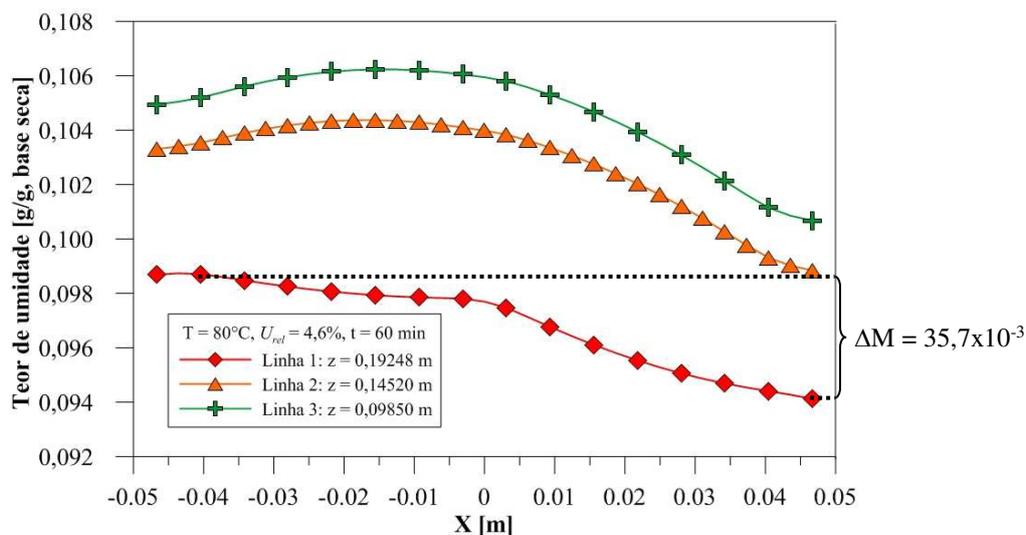


Figura 4.56: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 80°C.

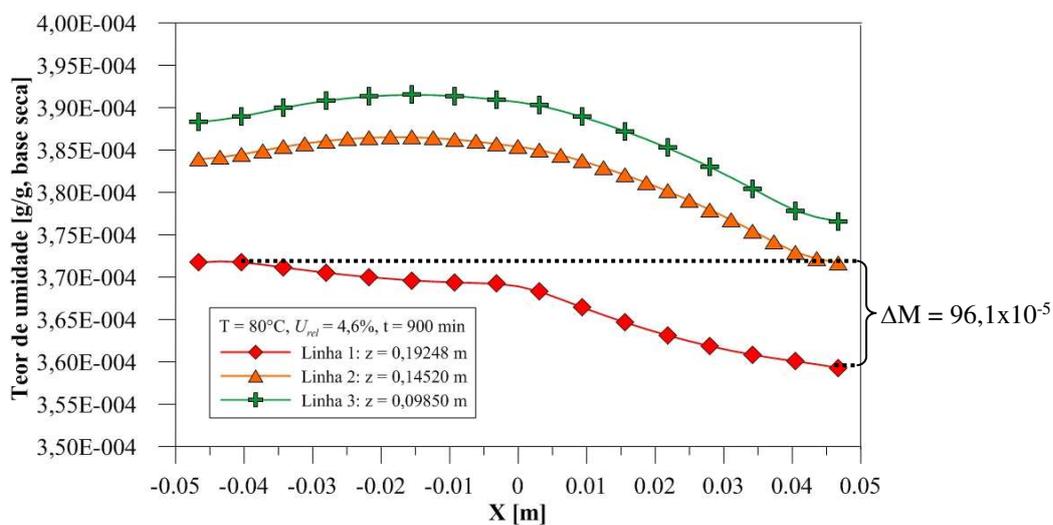


Figura 4.57: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 900 min de secagem a 80°C.

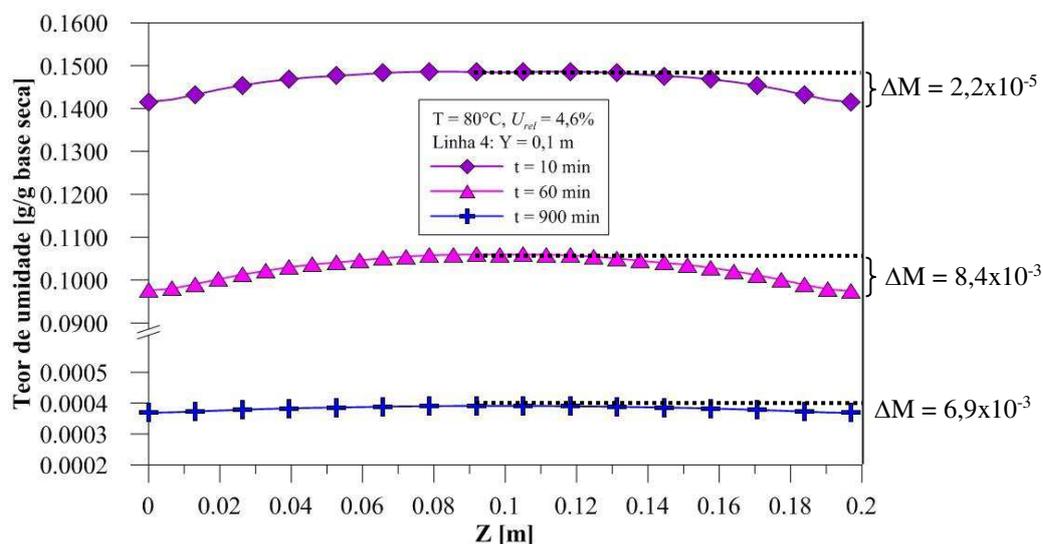


Figura 4.58: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 990 min de secagem a 80°C.

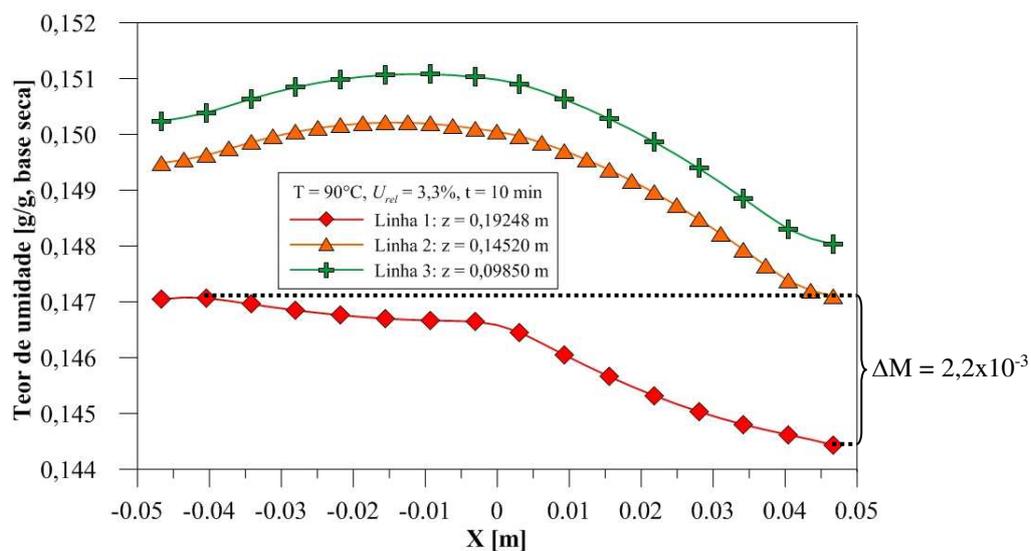


Figura 4.59: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 90°C.

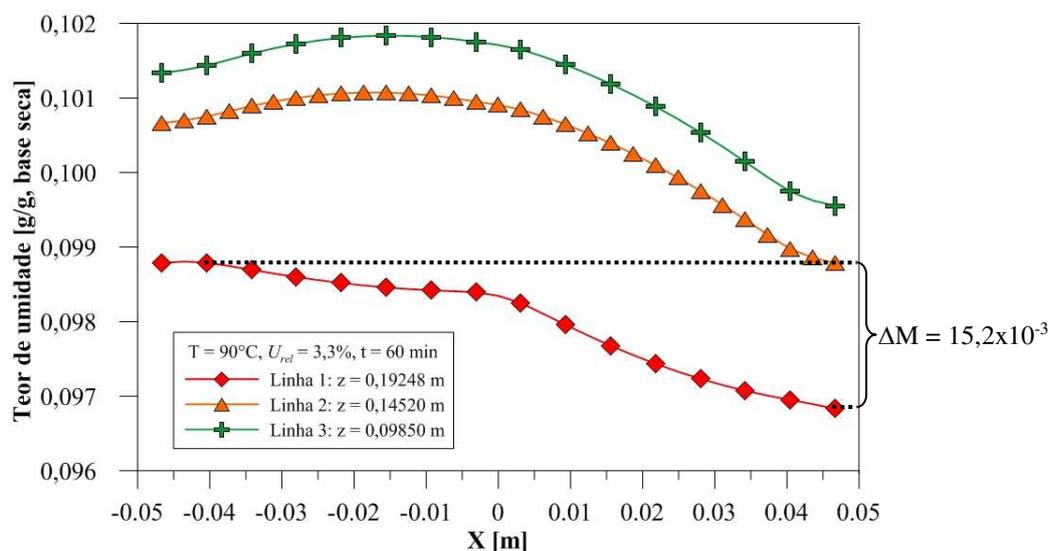


Figura 4.60: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 90°C.

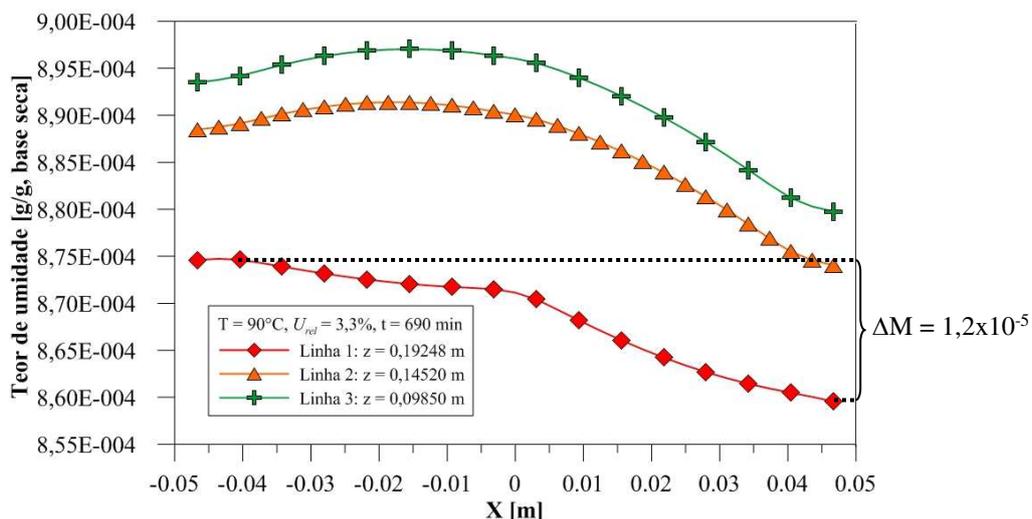


Figura 4.61: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 690 min de secagem a 90°C.

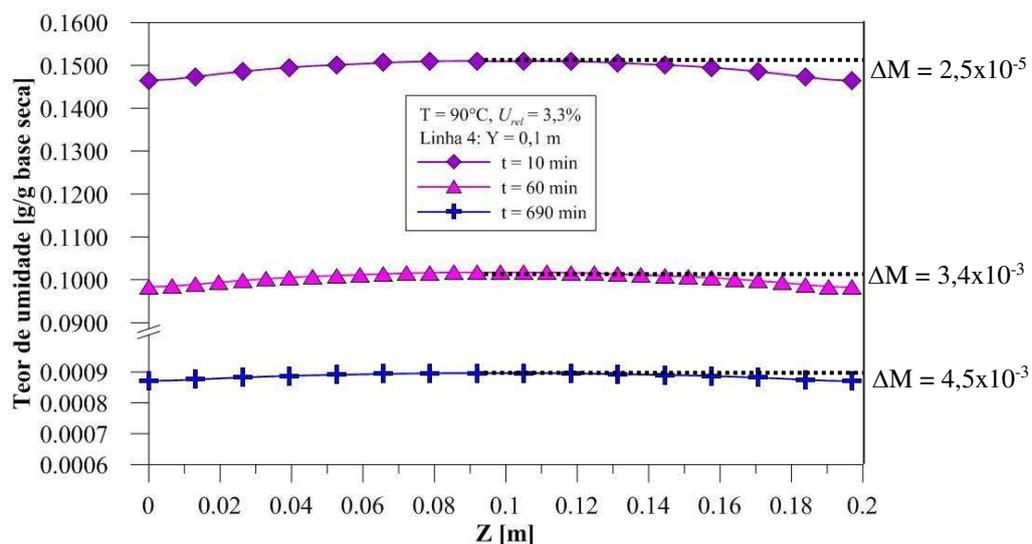


Figura 4.62: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 690 minutos de secagem a 90°C.

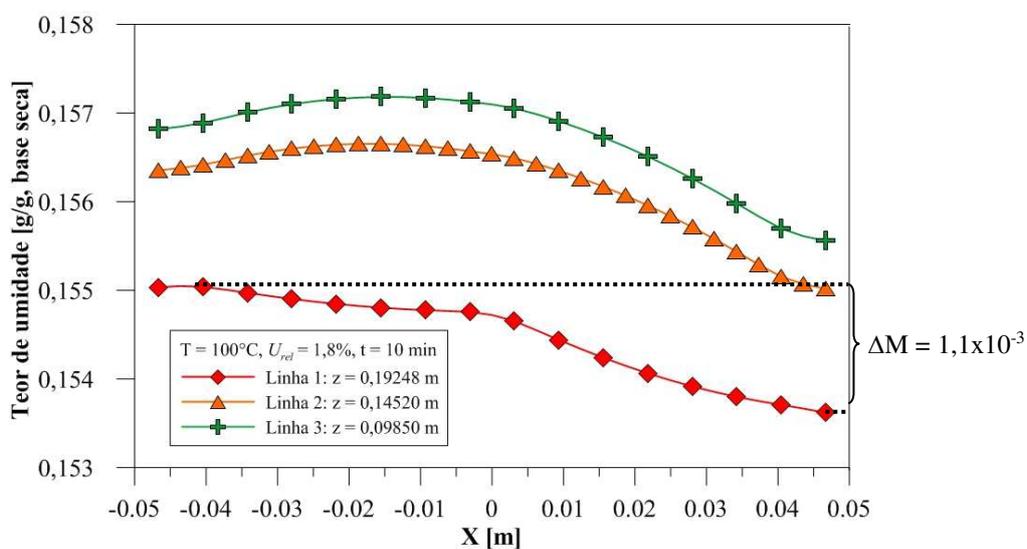


Figura 4.63: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 10 min de secagem a 100°C.

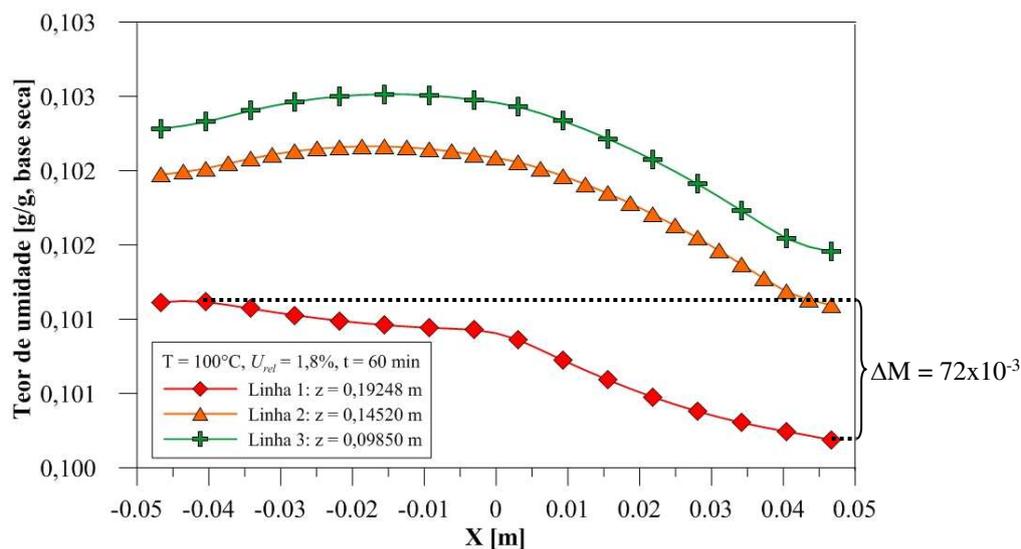


Figura 4.64: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 60 min de secagem a 100°C.

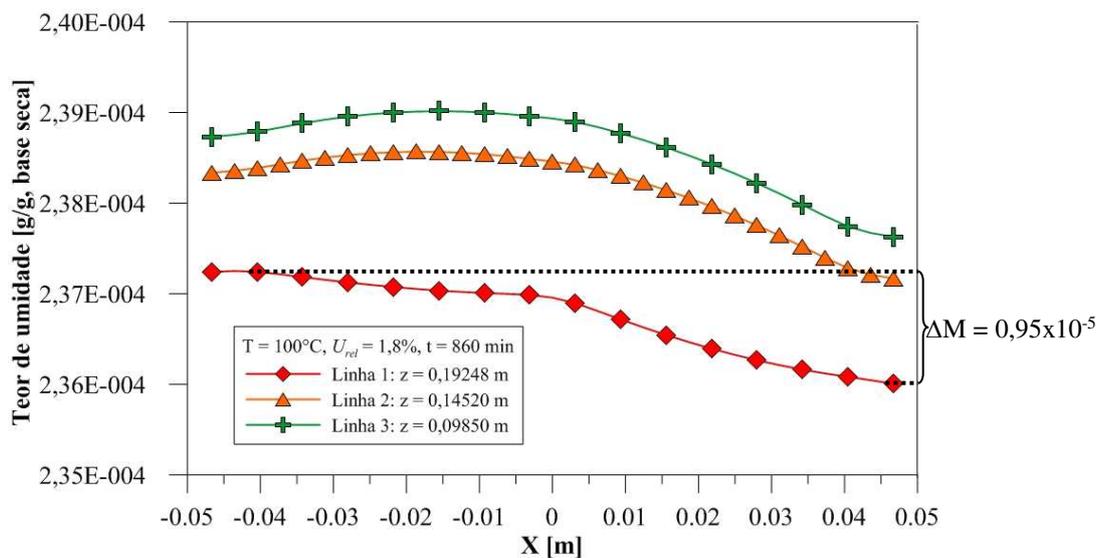


Figura 4.65: Teor de umidade no interior do tijolo nas linhas horizontais após 860 min de secagem a 100°C.

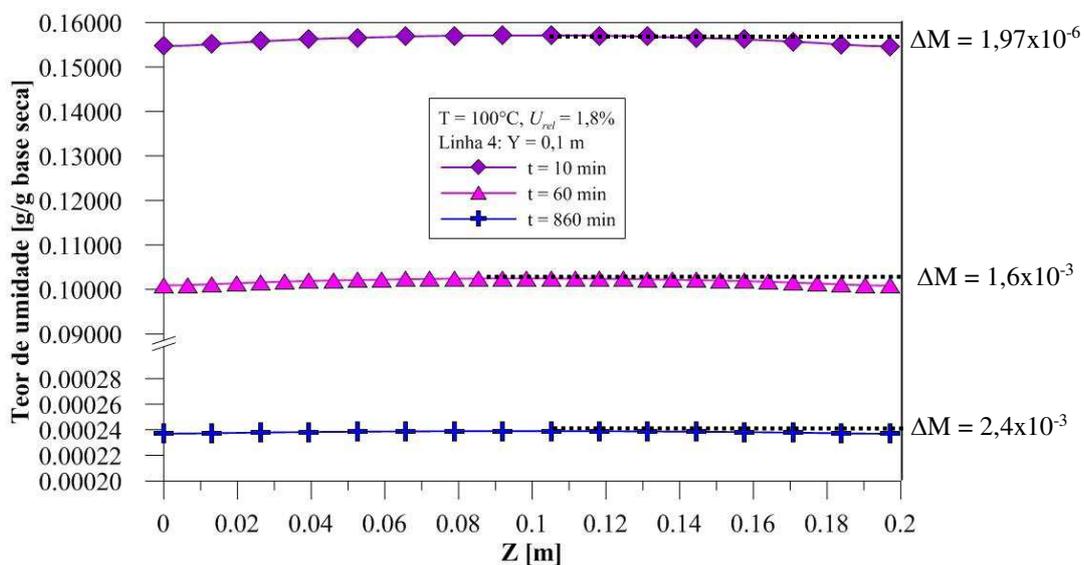


Figura 4.66: Teor de umidade na Linha 4 aos 10, 60 e 860 minutos de secagem a 100°C.

As Tabelas 4-9 à 4-12 resumem as variações no teor de umidade encontradas nas Linhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Assim como observado para a secagem a 50°C, nas demais temperaturas observa-se uma elevação nas variações máximas do teor de umidade em base seca entre os instantes de 10 min e 60 min, seguida da diminuição dessas variações nos instantes finais.

Para cada tijolo cerâmico utilizado nos testes experimentais, a massa de água inicial era diferente e isto ocorre devido ao próprio processo de fabricação do tijolo. Assim, para cada temperatura de secagem o tijolo cerâmico se encontrava inicialmente com uma massa de água distinta. Desta forma, não é possível fazer uma comparação entre as variações do teor de umidade referentes ao mesmo instante de tempo para diferentes temperaturas.

Tabela 4-9: Variações máximas do teor de umidade em base seca na Linha 1

| $\Delta M_{\text{máx}}$ [g/g] | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| | 10 min | 60 min | Tempo final |
| 50 | $10,7 \times 10^{-3}$ | $21,4 \times 10^{-3}$ | $61,7 \times 10^{-5}$ (t = 990 min) |
| 60 | $8,54 \times 10^{-3}$ | $15,1 \times 10^{-3}$ | $32,4 \times 10^{-5}$ (t = 820 min) |
| 70 | $6,45 \times 10^{-3}$ | $79,5 \times 10^{-3}$ | $81,7 \times 10^{-5}$ (t = 950 min) |
| 80 | $4,08 \times 10^{-3}$ | $35,7 \times 10^{-3}$ | $96,1 \times 10^{-5}$ (t = 900 min) |
| 90 | $2,15 \times 10^{-3}$ | $15,2 \times 10^{-3}$ | $1,16 \times 10^{-5}$ (t = 990 min) |
| 100 | $1,1 \times 10^{-3}$ | 72×10^{-3} | $0,95 \times 10^{-5}$ (t = 860 min) |

Tabela 4-10: Variações máximas do teor de umidade em base seca na Linha 2

| $\Delta M_{\text{máx}}$ [g/g] | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| | 10 min | 60 min | Tempo final |
| 50 | $8,75 \times 10^{-3}$ | 27×10^{-3} | $1,37 \times 10^{-3}$ (t = 990 min) |
| 60 | $8,09 \times 10^{-3}$ | $21,6 \times 10^{-3}$ | $0,565 \times 10^{-3}$ (t = 820 min) |
| 70 | $7,4 \times 10^{-3}$ | $11,7 \times 10^{-3}$ | $0,0481 \times 10^{-3}$ (t = 950 min) |
| 80 | $5,31 \times 10^{-3}$ | $5,14 \times 10^{-3}$ | $0,0137 \times 10^{-3}$ (t = 900 min) |
| 90 | $2,95 \times 10^{-3}$ | $2,12 \times 10^{-3}$ | $1,6 \times 10^{-3}$ (t = 990 min) |
| 100 | $1,52 \times 10^{-3}$ | $9,91 \times 10^{-3}$ | $1,29 \times 10^{-6}$ (t = 860 min) |

Tabela 4-11: Variações máximas do teor de umidade em base seca na Linha 3

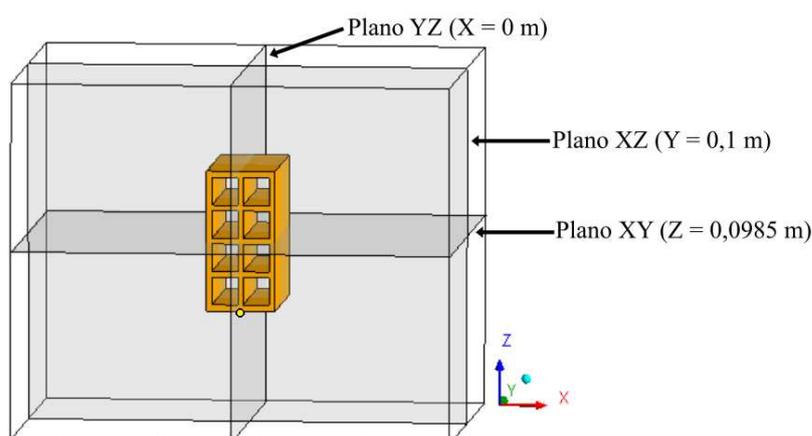
| $\Delta M_{\text{máx}}$ [g/g] | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| | 10 min | 60 min | Tempo final |
| 50 | $8,39 \times 10^{-3}$ | $26,1 \times 10^{-3}$ | $1,58 \times 10^{-3}$ (t = 990 min) |
| 60 | $7,72 \times 10^{-3}$ | $21,2 \times 10^{-3}$ | $0,616 \times 10^{-3}$ (t = 820 min) |
| 70 | $7,01 \times 10^{-3}$ | $11,9 \times 10^{-3}$ | $5,03 \times 10^{-5}$ (t = 950 min) |
| 80 | $5,12 \times 10^{-3}$ | $5,27 \times 10^{-3}$ | $1,41 \times 10^{-5}$ (t = 900 min) |
| 90 | $2,95 \times 10^{-3}$ | $2,16 \times 10^{-3}$ | $1,63 \times 10^{-5}$ (t = 990 min) |
| 100 | $1,54 \times 10^{-3}$ | $1,00 \times 10^{-3}$ | $1,31 \times 10^{-6}$ (t = 860 min) |

Tabela 4-12: Variações máximas do teor de umidade em base seca na Linha 4

| $\Delta M_{\text{máx}}$ [g/g] | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| | 10 min | 60 min | Tempo final |
| 50 | $9,86 \times 10^{-3}$ | $30,8 \times 10^{-3}$ | $2,44 \times 10^{-3}$ (t = 990 min) |
| 60 | $8,68 \times 10^{-3}$ | 28×10^{-3} | $0,983 \times 10^{-3}$ (t = 820 min) |
| 70 | $8,25 \times 10^{-3}$ | $18,2 \times 10^{-3}$ | $7,96 \times 10^{-5}$ (t = 950 min) |
| 80 | $6,87 \times 10^{-3}$ | $8,36 \times 10^{-3}$ | $2,18 \times 10^{-5}$ (t = 900 min) |
| 90 | $4,49 \times 10^{-3}$ | $3,37 \times 10^{-3}$ | $2,49 \times 10^{-5}$ (t = 990 min) |
| 100 | $2,39 \times 10^{-3}$ | $1,55 \times 10^{-3}$ | $1,97 \times 10^{-6}$ (t = 860 min) |

4.2.3 Distribuição dos parâmetros de transporte no tijolo

Os planos YZ ($X = 0\text{m}$), XZ ($Y = 0,1\text{m}$) e XY ($Z = 0,0985\text{m}$) foram inseridos sobre os domínios sólido e fluido (Figura 4.67) para auxiliar na visualização e na análise dos parâmetros de transporte do tijolo (temperatura e massa de água) e ar (temperatura, massa de água, velocidade e pressão).

**Figura 4.67:** Planos de análise sobre os domínios fluido e sólido.

4.2.3.1 Campo de temperatura no tijolo

Para uma análise térmica apropriada, foram representados os campos de temperatura sobre a superfície do tijolo (Figuras 4.68 à 4.73). A avaliação de campos de temperatura, assim como campos de teor de umidade discutidos posteriormente, só é possível quando há a simulação numérica do domínio sólido, referente ao tijolo cerâmico, acrescida do domínio fluido, referente ao ar de secagem. Observe que em estudos onde a simulação numérica acontece apenas para o domínio sólido/poroso, como ocorre nos trabalhos de Cadé *et al.* (2005), Silva (2009), Silva *et al.* (2011), Silva *et al.* (2013) e Shokouhmand *et al.* (2014), a ausência do domínio externo permite que se enxergue os campos de temperatura e/ou umidade apenas no interior do material cerâmico.

Da análise das Figuras 4.68 à 4.73 percebe-se uma pequena variação de temperatura nessa região, o que pode reduzir os efeitos de uma secagem desigual e, conseqüentemente, falhas no material na etapa da queima. Os resultados mostram que a maior variação de temperatura ocorre sempre na primeira hora do processo. Observa-se que, ao se usar uma temperatura de secagem de 50°C, obteve-se um $\Delta T_{\text{máx}} = 4,5^{\circ}\text{C}$. Já para a temperatura de 100°C, esta variação foi de $\Delta T_{\text{máx}} = 16^{\circ}\text{C}$. Note que os vértices do lado direito do tijolo são aquecidos mais rapidamente em comparação com as demais regiões, evidenciando que não é apropriado assumir uma temperatura constante na superfície do sólido. Devido à direção de escoamento do ar (da direita para a esquerda, perpendicular ao plano ZY), a parte interna do tijolo permanece mais fria que as demais em toda a secagem. Esse aquecimento assimétrico mostra que a posição do material dentro da estufa afeta diretamente o gradiente de temperatura e, conseqüentemente, o de umidade. Espera-se, portanto, que uma simples mudança na posição do tijolo dentro da estufa modifica completamente o comportamento da temperatura sobre a superfície do sólido.

É importante frisar que gradientes de temperatura elevadas, proveniente de uma secagem sem controle, pode provocar vários tipos de defeitos no tijolo tais como: trincas, deformações, fissuras, entre outros. Este tipo de problema pode ocorrer ao se usar, como condição do ar de secagem, temperatura e velocidade elevadas, e umidade relativamente baixa. Obviamente não se está levando em consideração a existência de defeitos provenientes do processo de conformação.

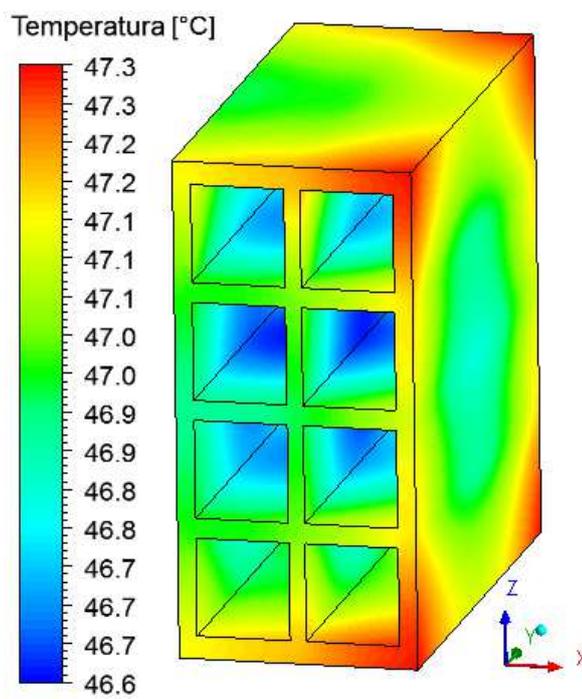
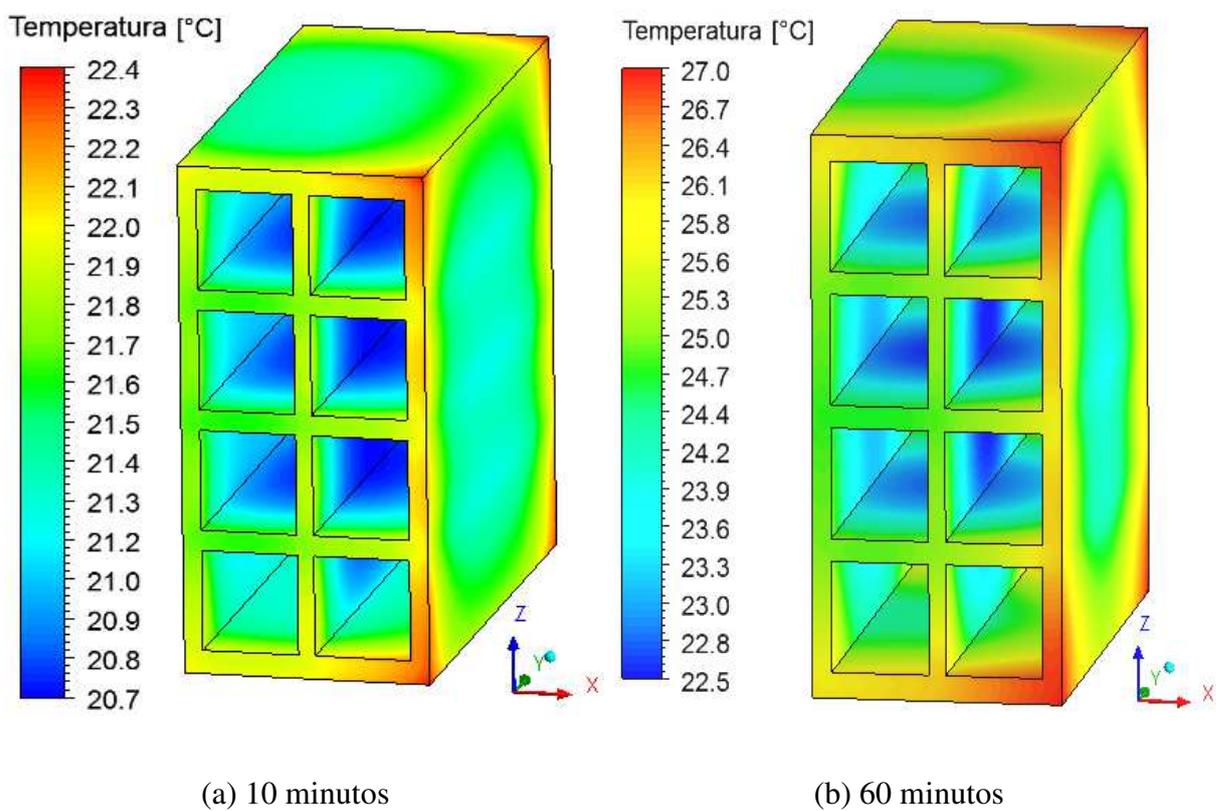
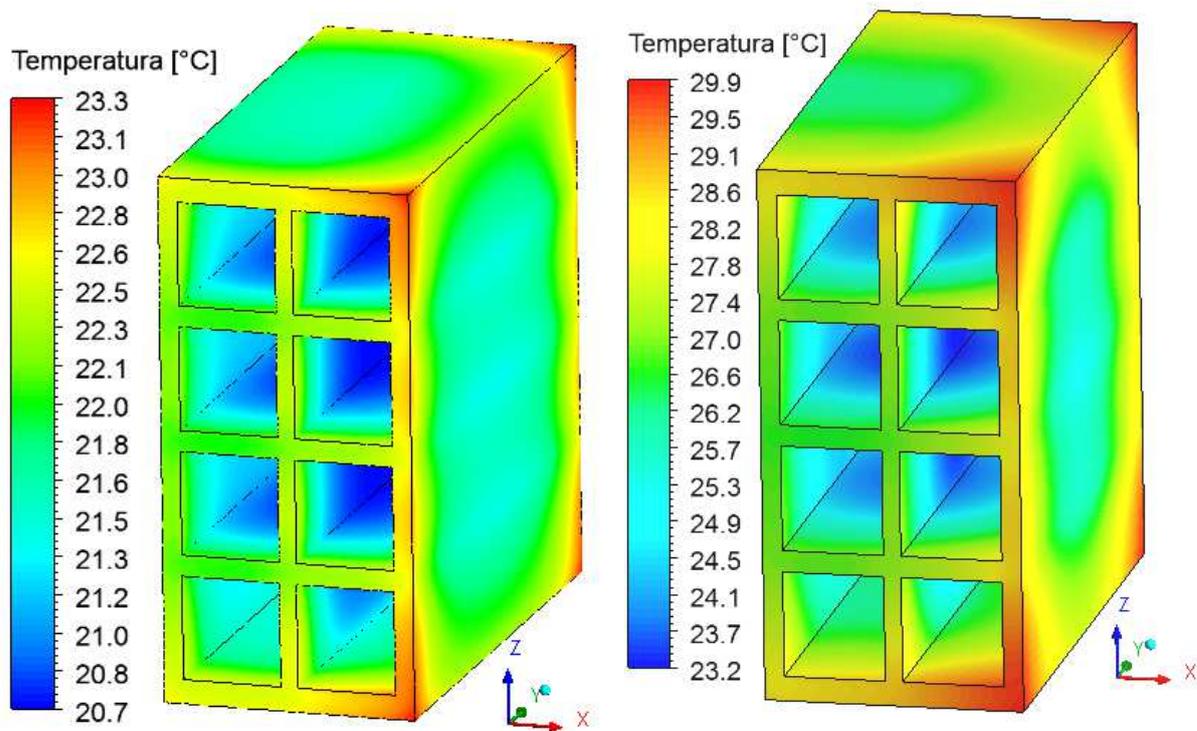
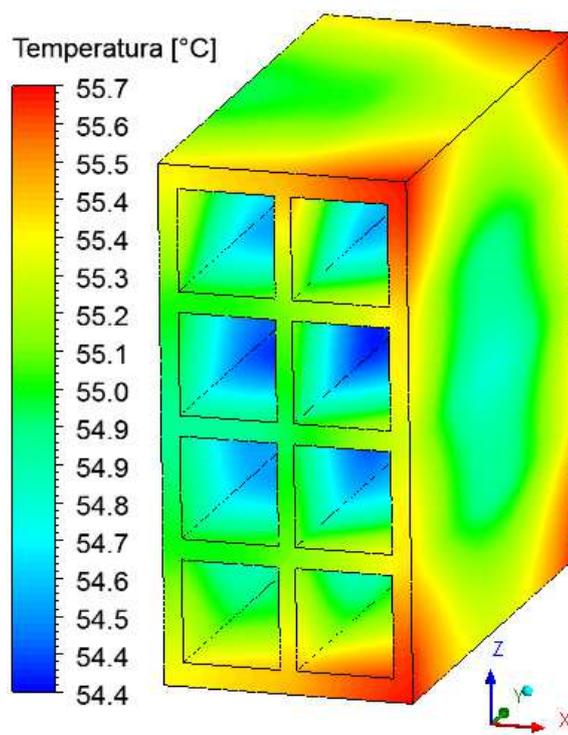


Figura 4.68: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 50°C.



(a) 10 minutos

(b) 60 minutos



(c) 820 minutos

Figura 4.69: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 60°C.

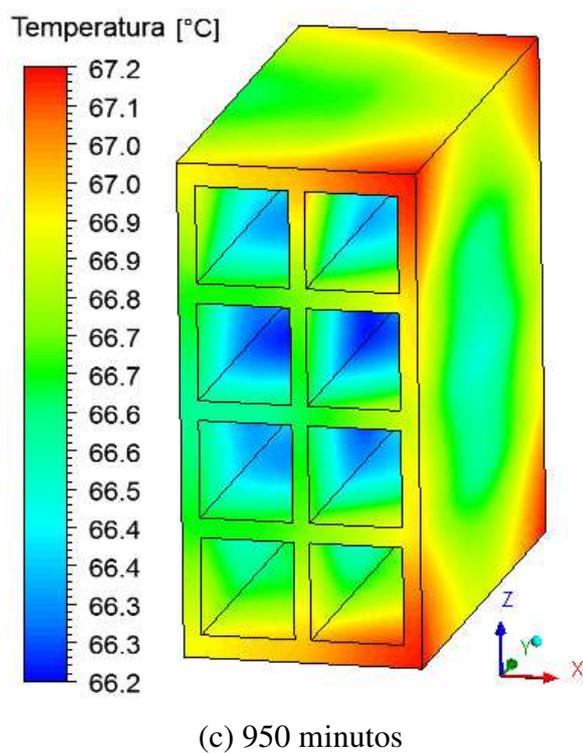
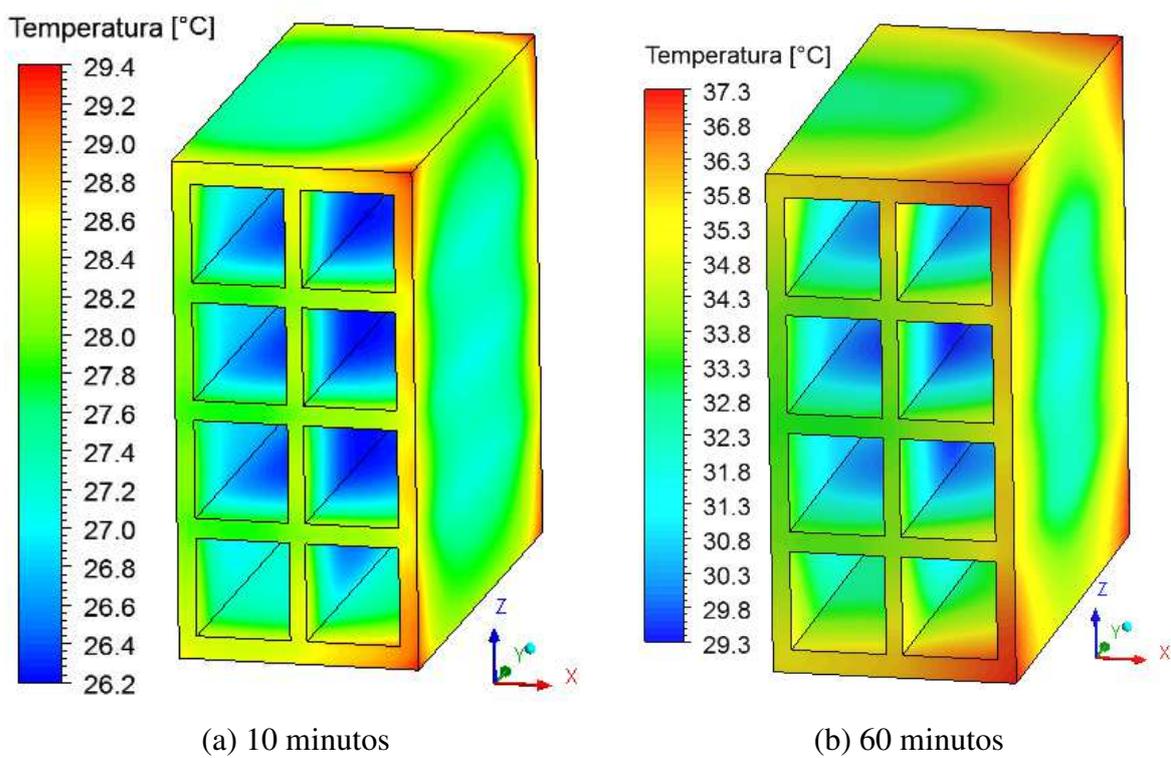


Figura 4.70: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 70°C.

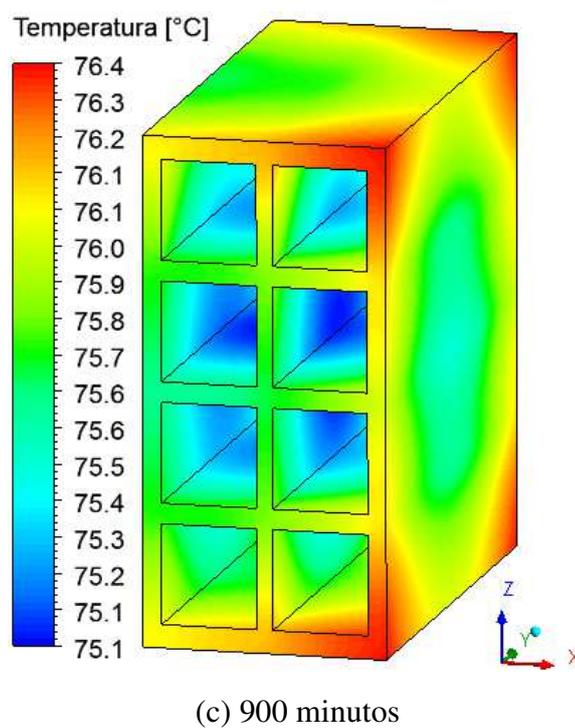
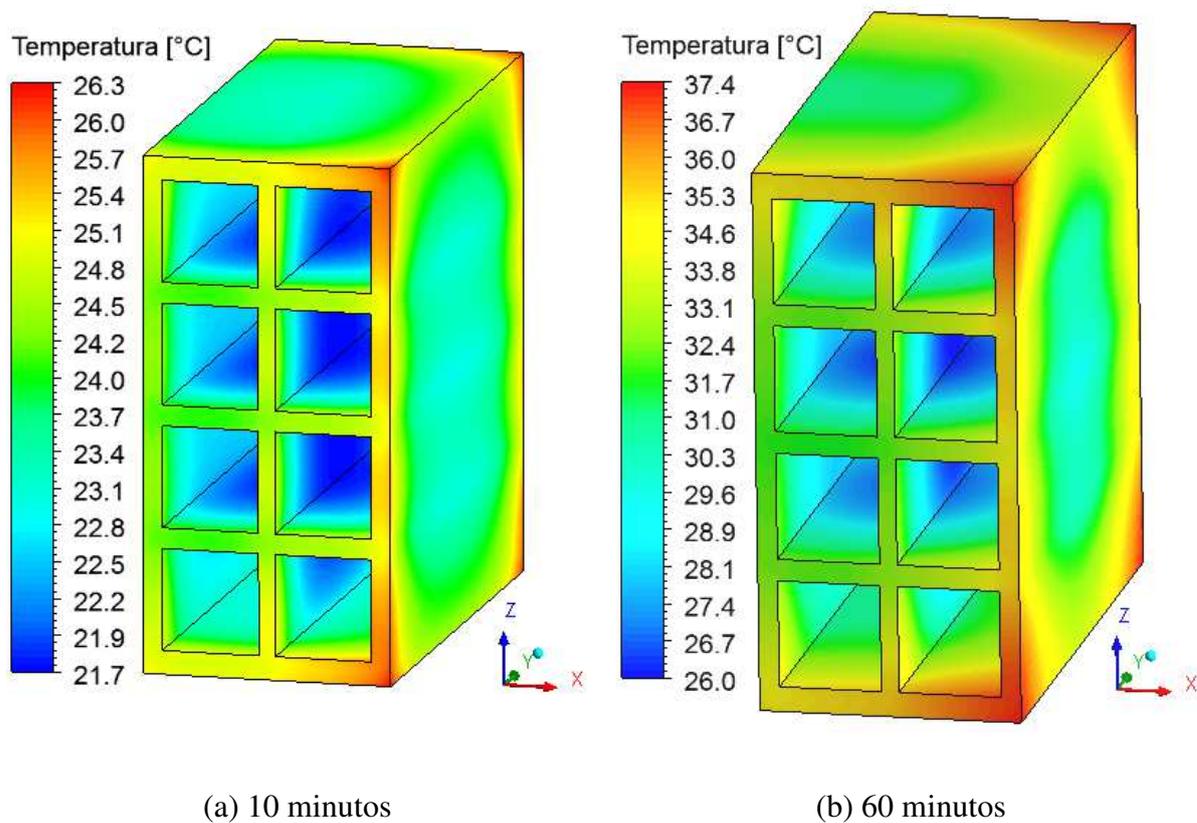
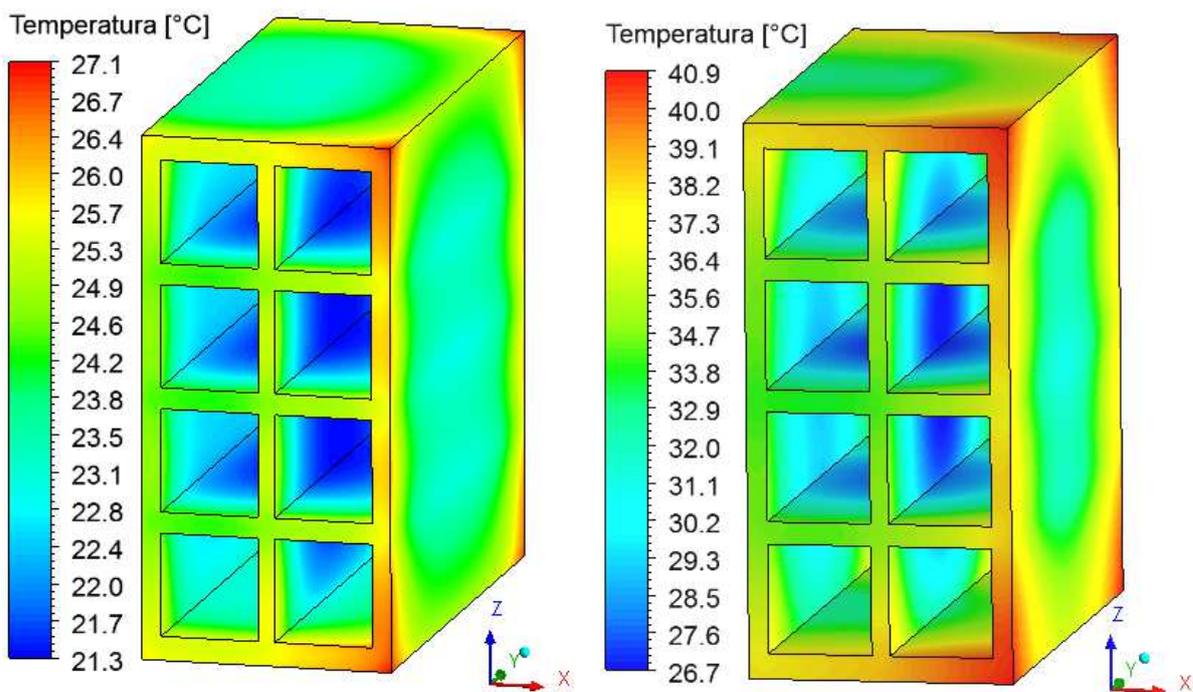
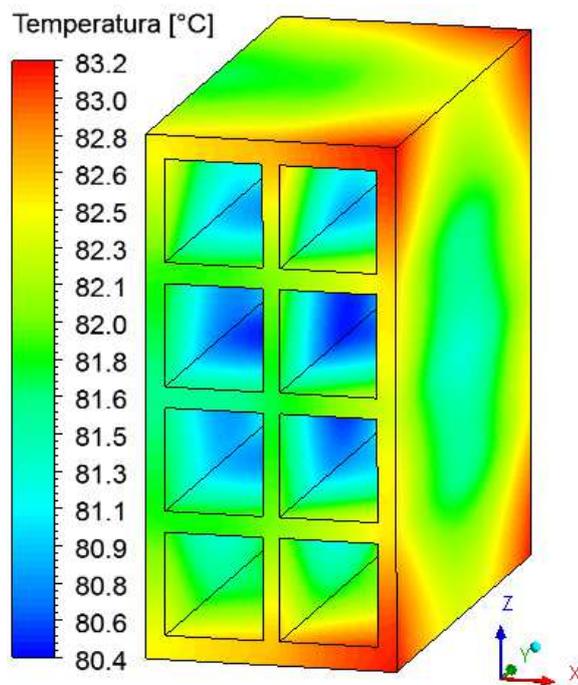


Figura 4.71: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 80°C.



(a) 10 minutos

(b) 60 minutos



(b) 690 minutos

Figura 4.72: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 90°C.

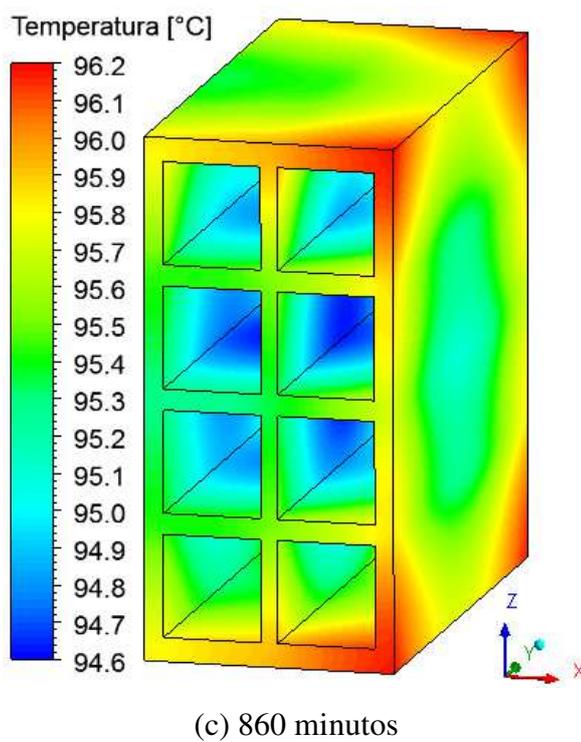
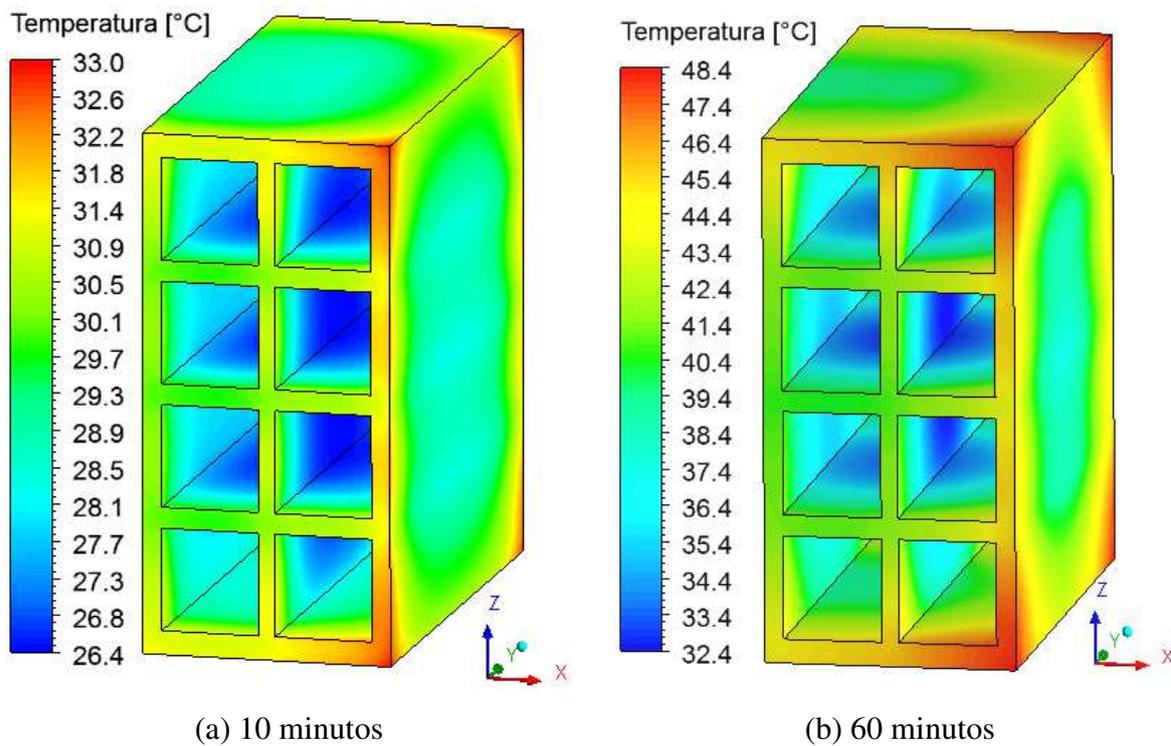


Figura 4.73: Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 100°C.

As Figuras 4.74 a 4.79 ilustram os campos de temperatura no interior do tijolo (plano XZ, em $Y = 0,1$ m) após 10 minutos, 90 minutos e no tempo de equilíbrio, que corresponde ao final da secagem.

Após análise destas figuras percebe-se claramente os gradientes de temperatura no interior do sólido ao longo do processo e, devido à posição do tijolo no interior da estufa, o aquecimento ocorre de maneira assimétrica lateralmente. A assimetria no processo de aquecimento de materiais cerâmicos ocorre devido à posição com relação ao fluxo do ar de secagem e é desconsiderada em muitos estudos, como por exemplo no trabalho de Silva *et al.* (2011) que expõe campos de temperatura adimensional apenas para uma parte do tijolo e considera que o comportamento observado é válido para todo o domínio.

A simetria ocorre entre as partes superior e inferior, pois não foi inserida a bandeja que sustenta o tijolo dentro da estufa.

A Tabela 4-13 expõe as variações de temperatura máximas obtidas a partir das Figuras 4.74 a 4.79. Nota-se que, nos instantes iniciais ($t = 10$ minutos), a variação de temperatura é mínima, pois o tijolo ainda se encontra com temperatura próxima a da inicial. Após 60 minutos de processo, a variação máxima de temperatura eleva-se significativamente. Nos instantes finais do processo, em que já houve tempo suficiente do calor se difundir em todo o tijolo, esta variação de temperatura é reduzida para valores baixos, indicando que o tijolo se apresenta com uma temperatura quase uniforme.

Além disso, a elevação da temperatura do ar de secagem faz com que haja um crescimento nos valores desta variação de temperatura máxima em todos os instantes de tempo, visto que os tijolos utilizados em todos os experimentos se encontravam inicialmente com temperaturas próximas (de 20,6 a 26,1°C).

Tabela 4-13: Variações de temperatura máximas no interior do tijolo (Plano XZ).

| T [°C] | $\Delta T_{\text{máx}}$ [°C] | | |
|--------|------------------------------|--------|--------------------|
| | 10 min | 60 min | Tempo final |
| 50 | 1,07 | 2,91 | 0,50 (t = 990 min) |
| 60 | 1,63 | 4,37 | 0,93 (t = 820 min) |
| 70 | 2,01 | 5,30 | 0,68 (t = 950 min) |
| 80 | 2,91 | 7,59 | 0,95 (t = 900 min) |
| 90 | 3,67 | 9,48 | 1,95 (t = 990 min) |
| 100 | 4,16 | 10,66 | 1,16 (t = 860 min) |

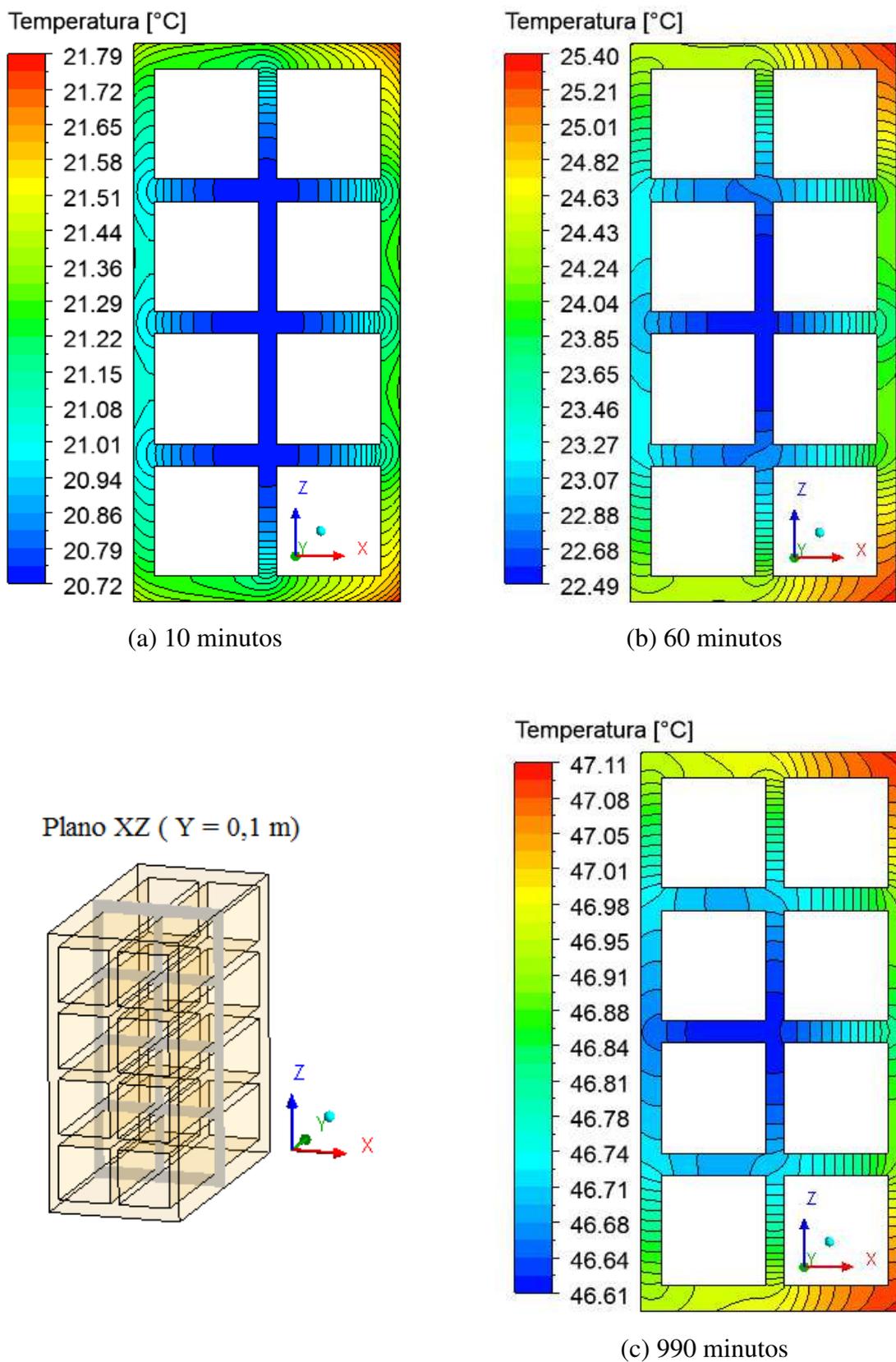
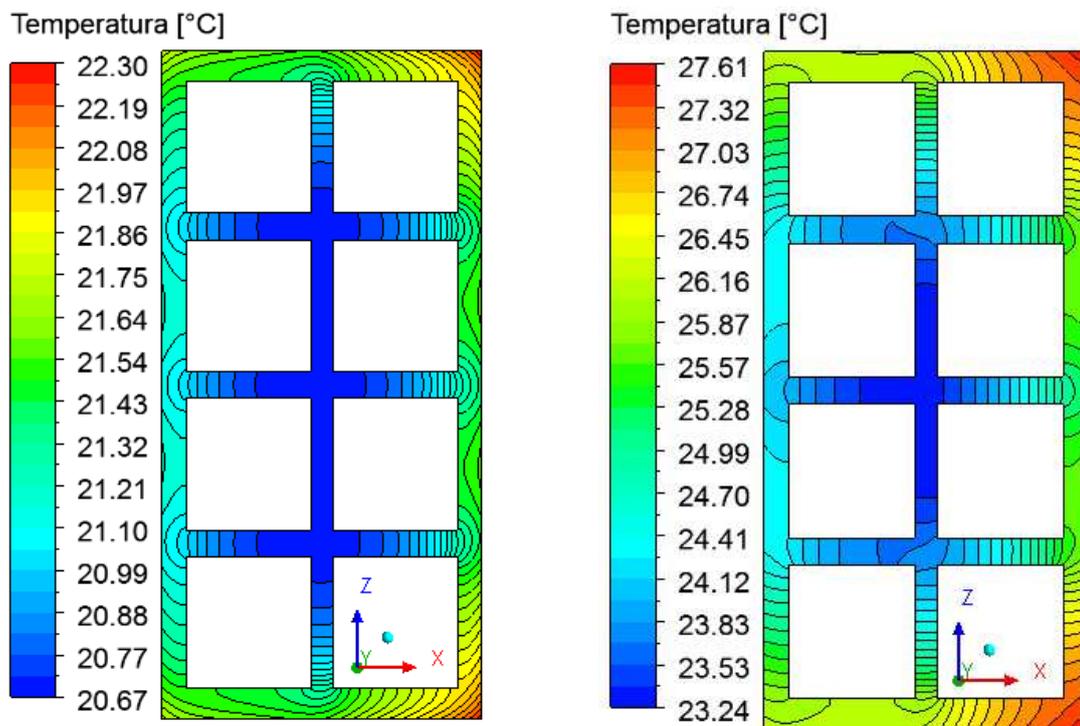
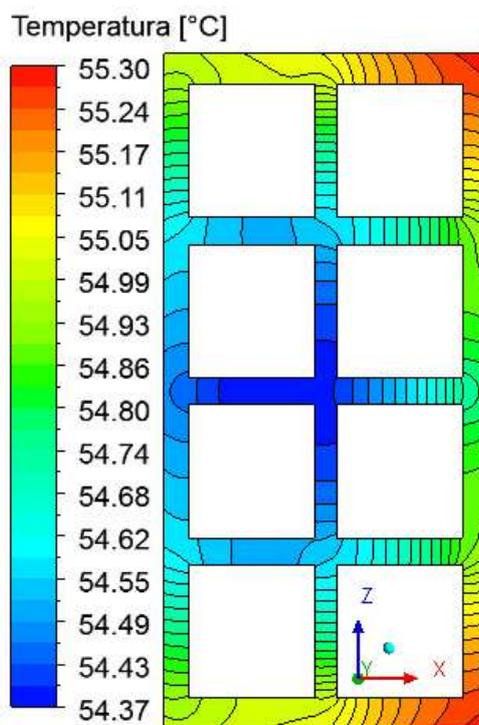


Figura 4.74: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 50°C.



(a) 10 minutos

(b) 60 minutos



(c) 820 minutos

Figura 4.75: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 60°C.

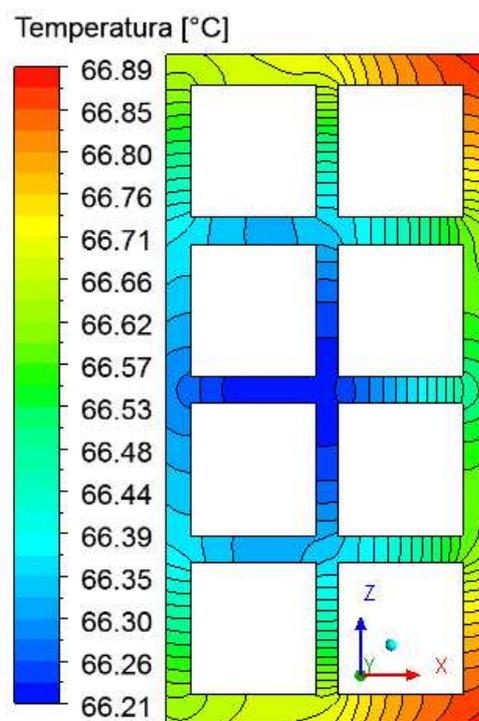
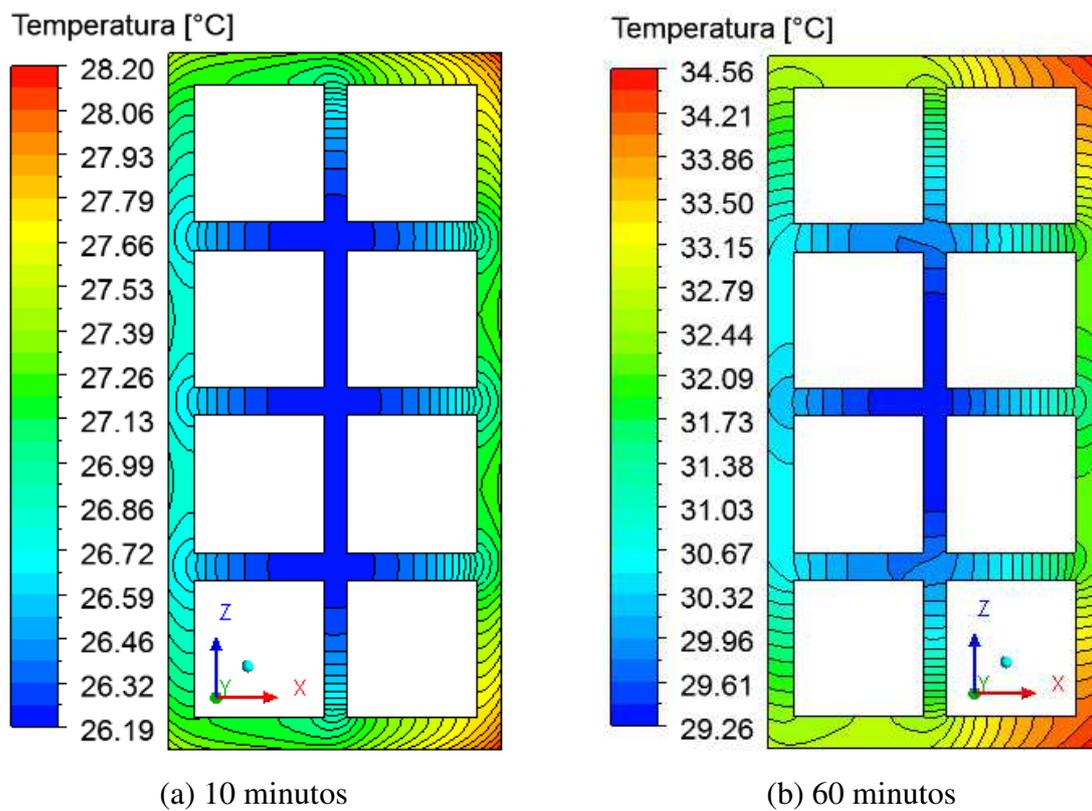
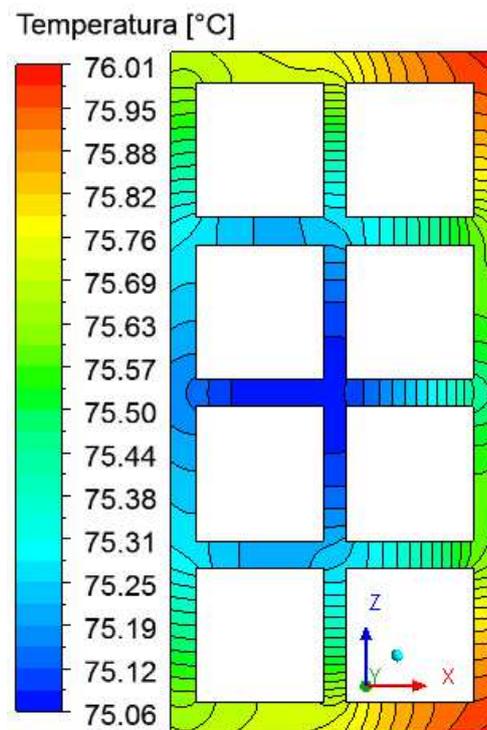
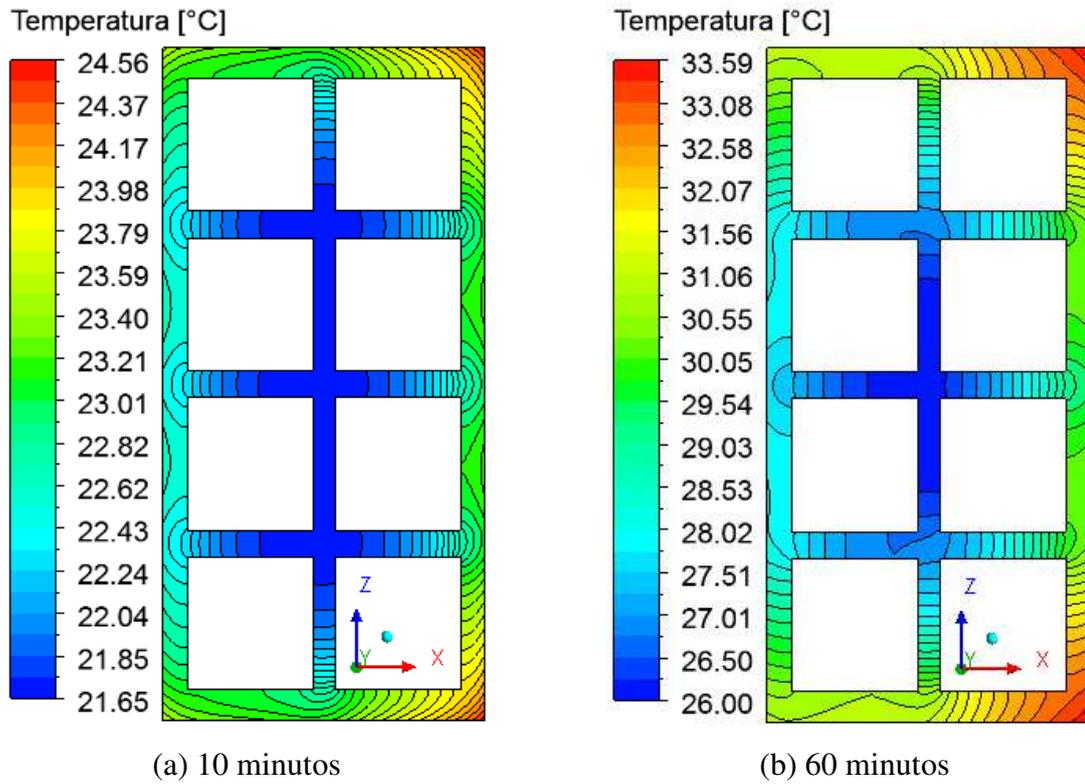


Figura 4.76: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 70°C.



(c) 900 minutos

Figura 4.77: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 80°C.

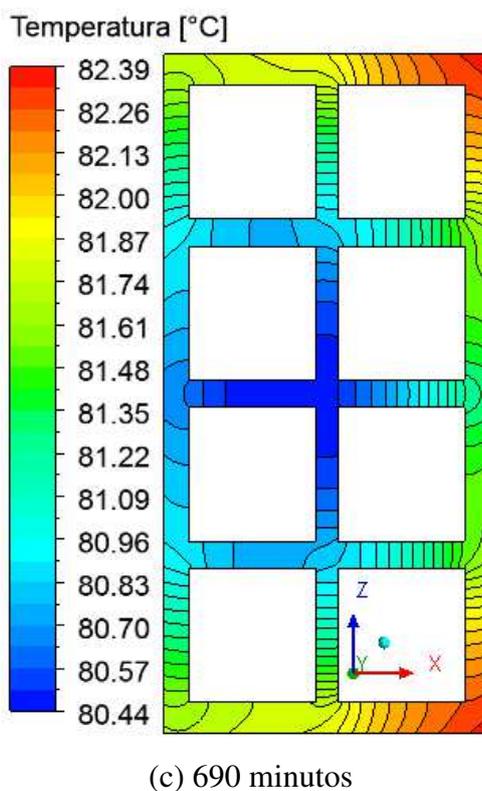
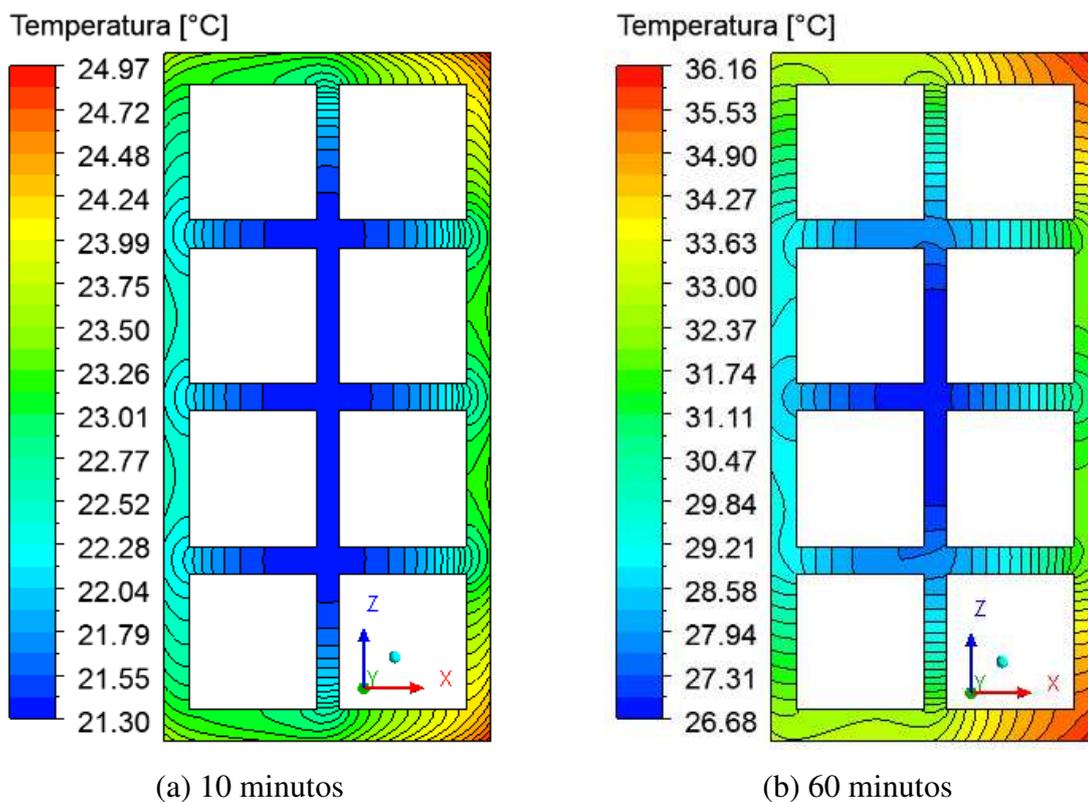
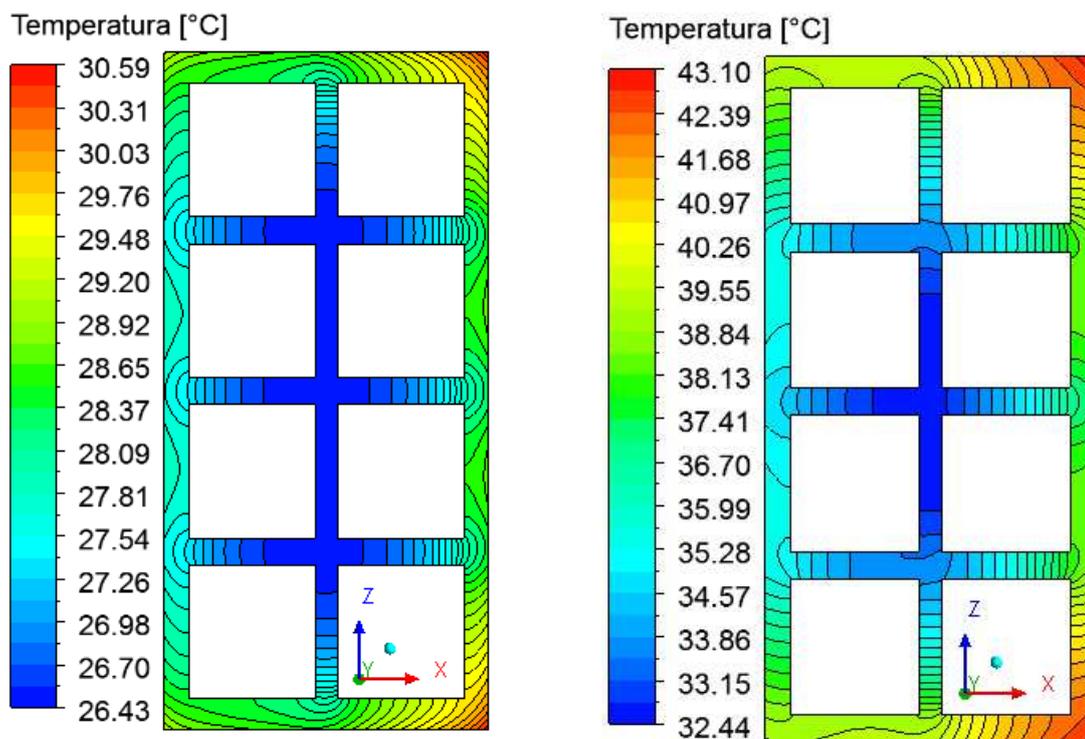
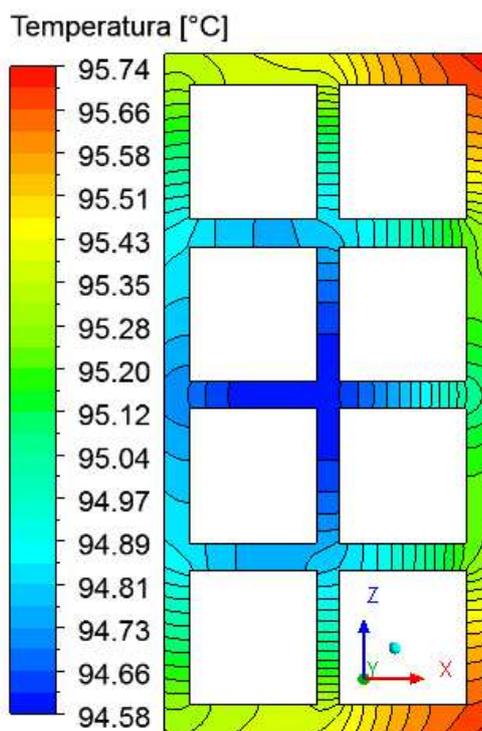


Figura 4.78: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 90°C.



(a) 10 minutos

(b) 60 minutos



(c) 860 minutos

Figura 4.79: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XZ) para a secagem a 100°C.

Nas Figuras 4.80 a 4.85 estão ilustrados os campos de temperatura no interior do tijolo cerâmico sobre o Plano XY ($Z = 0,0985\text{m}$) nos instantes de 10 minutos, 60 minutos e no tempo final, para cada secagem. A partir da análise dessas figuras pode-se notar que o aquecimento do material se inicia nos vértices do lado direito, que são os que primeiro sofrem a ação do ar quente. Dessa região, o calor se difunde para as outras regiões do material. Há, portanto, assimetria no aquecimento, na direção horizontal. Na direção vertical, ocorre simetria de aquecimento.

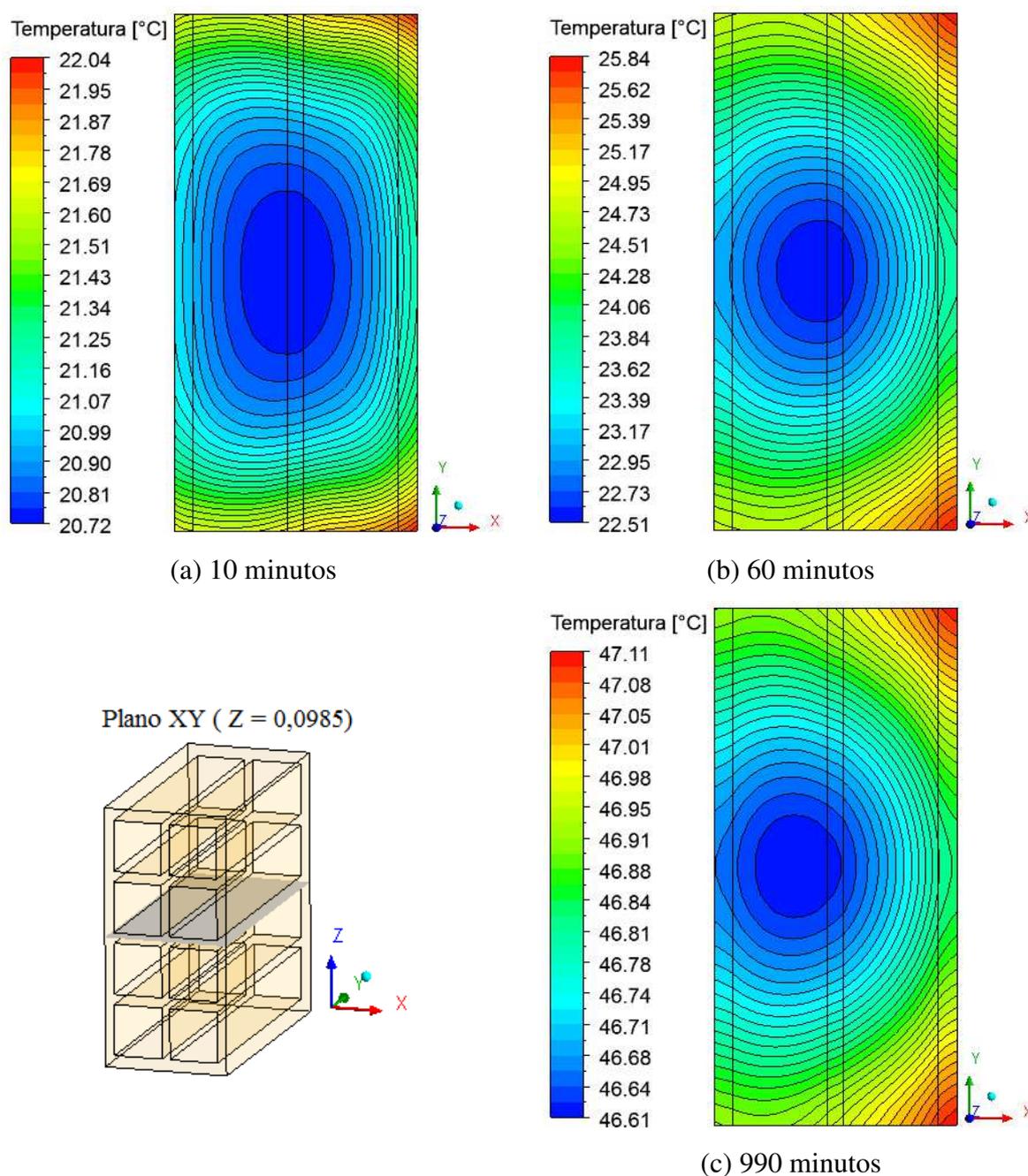
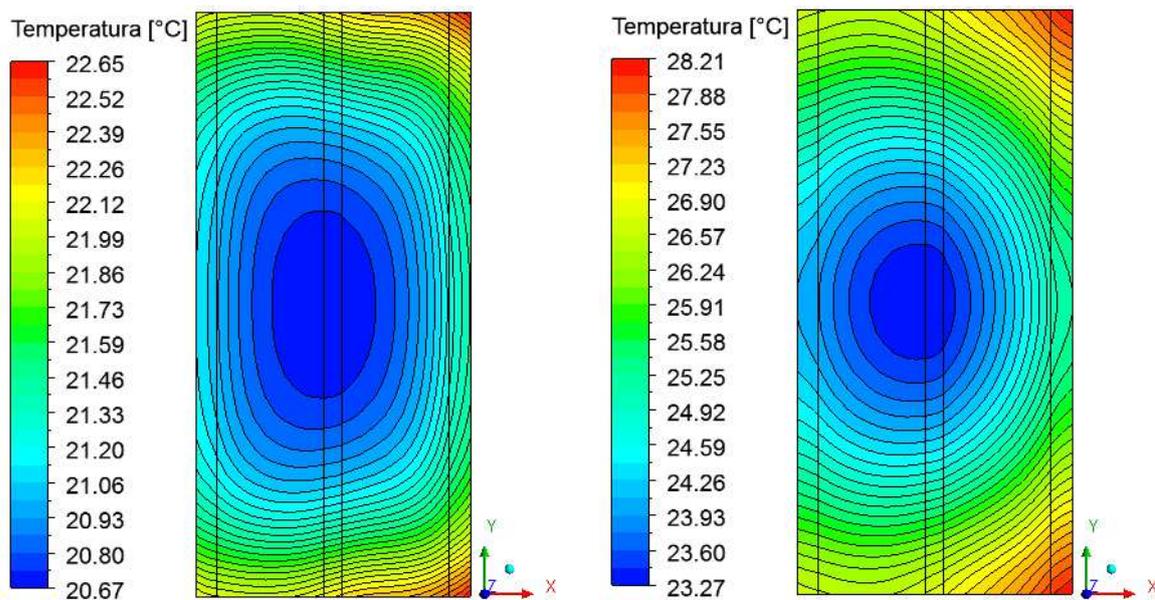
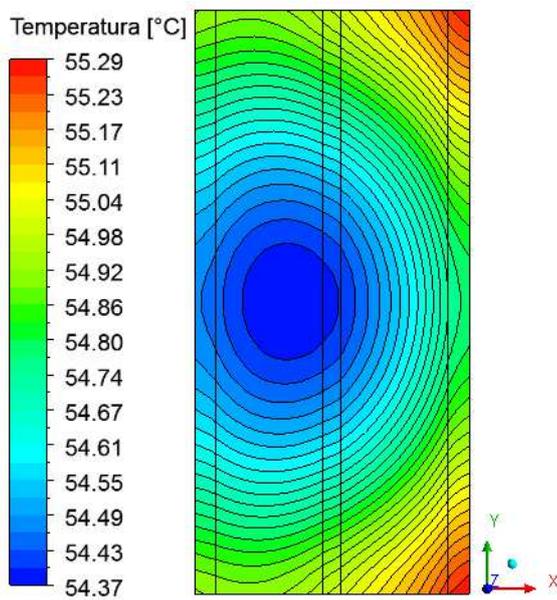


Figura 4.80: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 50°C .



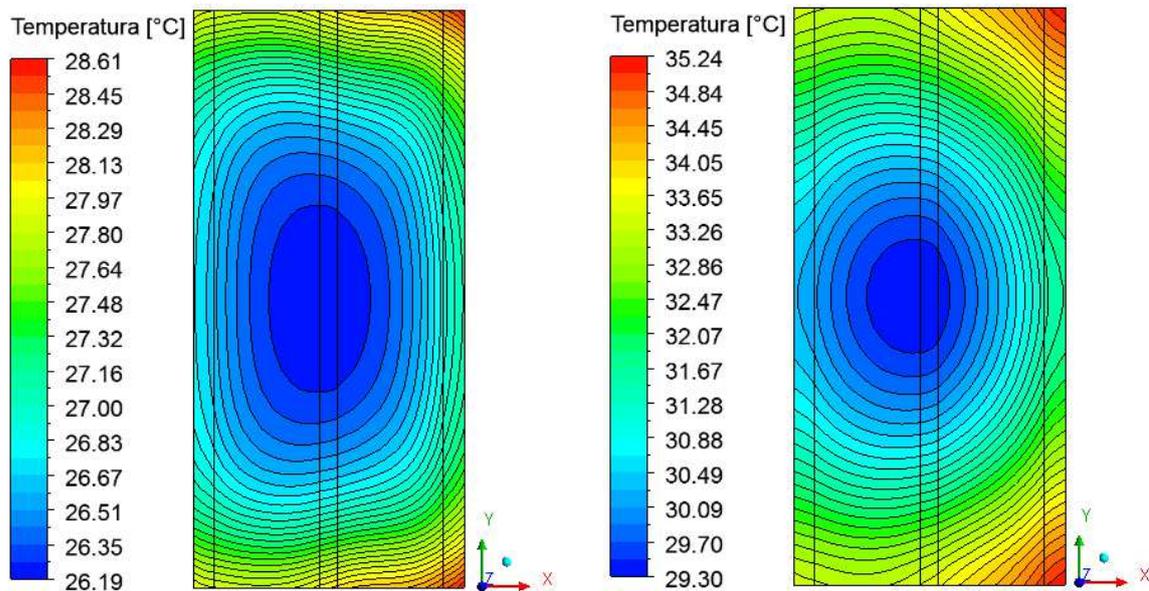
(a) 10 minutos

(b) 60 minutos



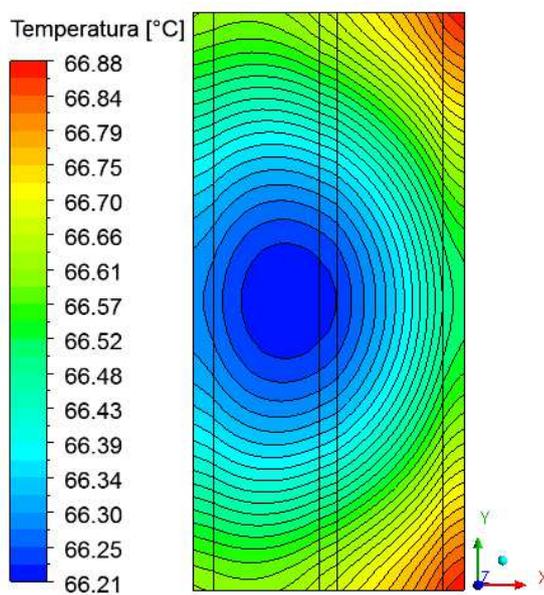
(c) 820 minutos

Figura 4.81: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 60°C.



(a) 10 minutos

(b) 60 minutos



(c) 950 minutos

Figura 4.82: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 70°C.

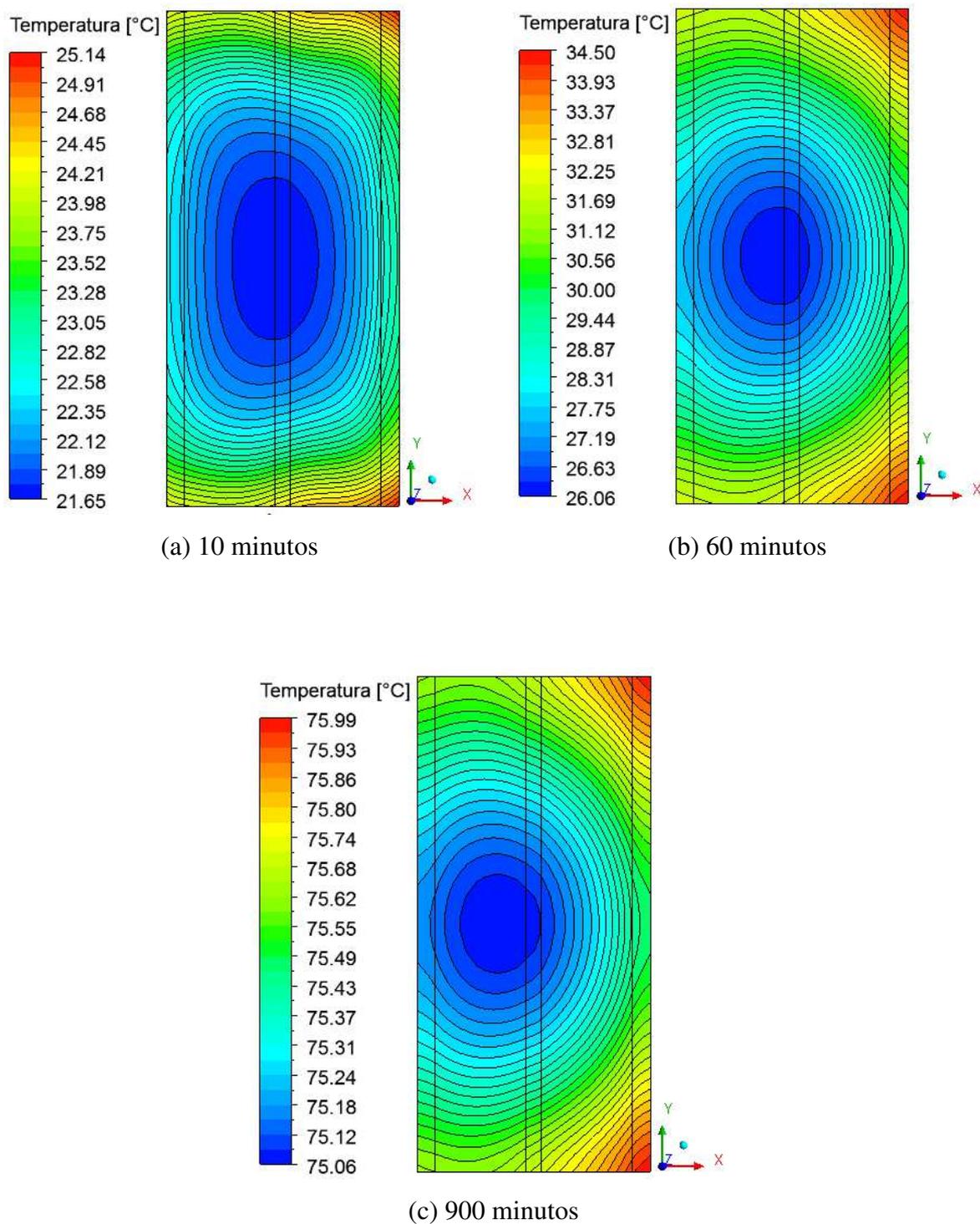


Figura 4.83: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 80°C.

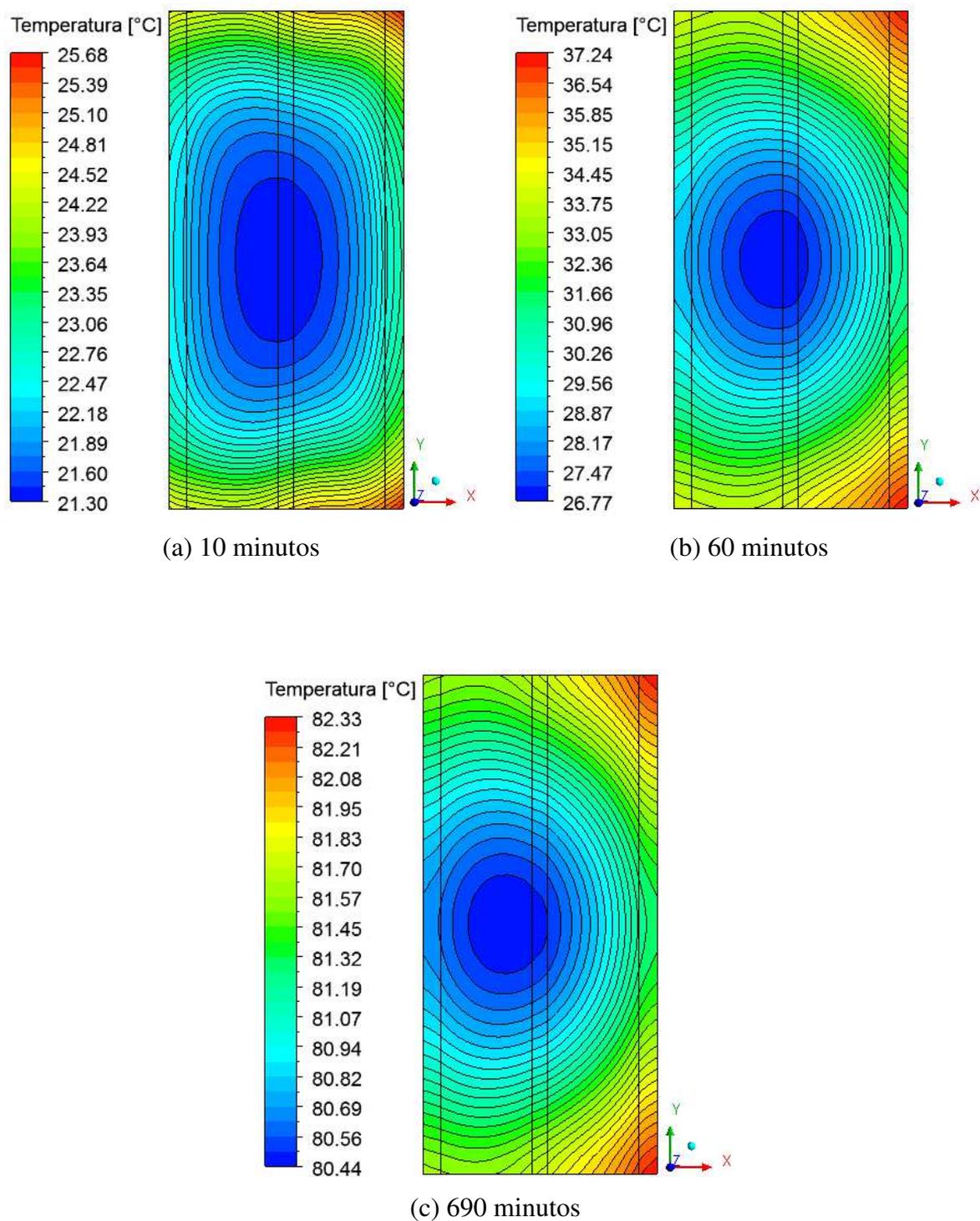


Figura 4.84: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 90°C .

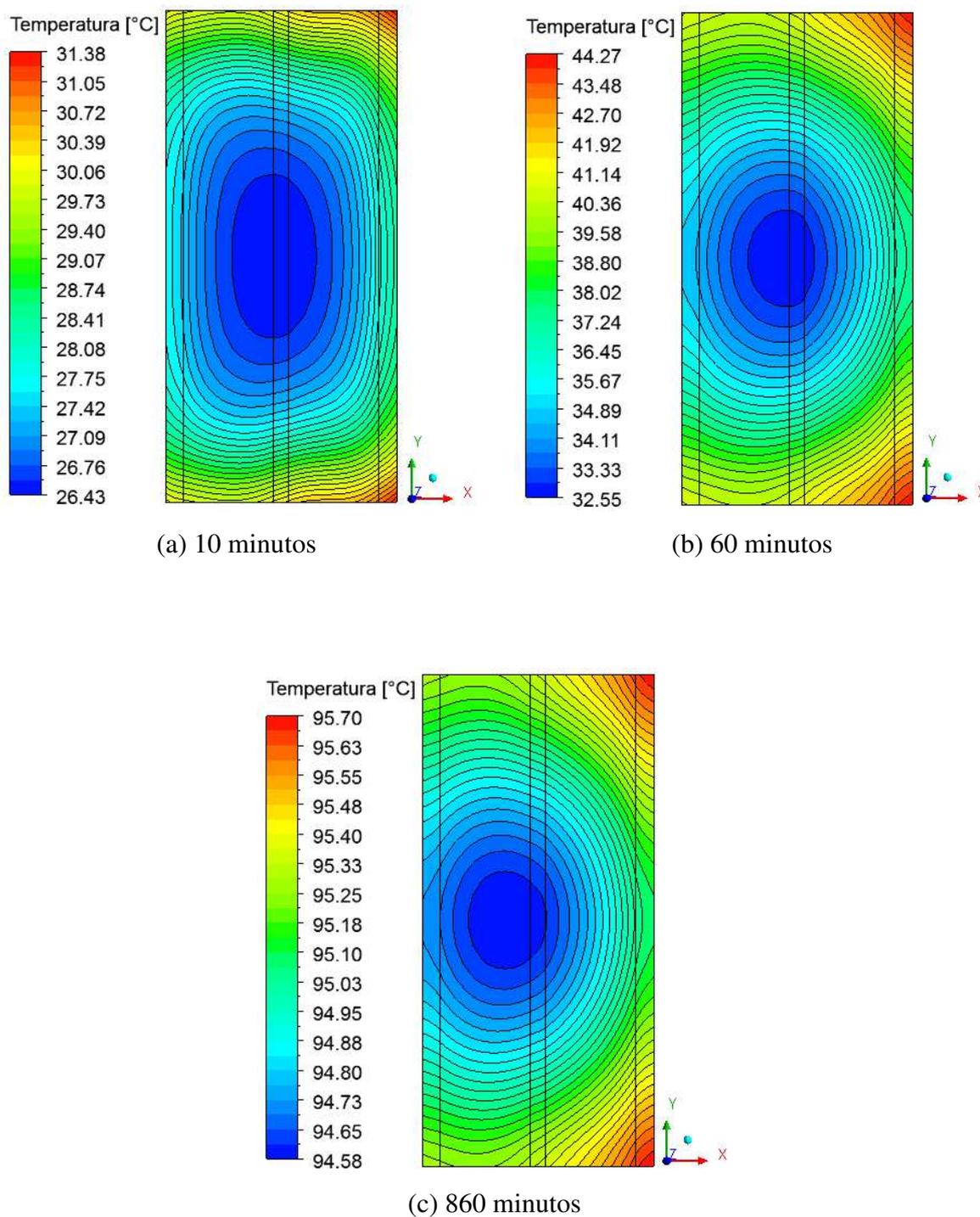


Figura 4.85: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano XY) para a secagem a 100°C.

As Figuras 4.87 a 4.92 ilustram os campos de temperatura na lateral do tijolo sobre o Plano YZ em $X = 0$ (Figura 4.86). Da análise dessas figuras verifica-se que o centro do material cerâmico permanece com uma temperatura inferior à dos vértices ao longo de todo o processo de secagem. Há simetria nas direções horizontal e vertical.

A Tabela 4-14 expõe as variações de temperatura máximas obtidos a partir das Figuras 4.80 a 4.92.

Nos instantes iniciais do processo os gradientes de temperatura são baixos, crescem em seguida, e por fim decrescem, chegando a um valor mínimo no equilíbrio. Comparando as variações de temperatura exibidas nos planos XY e YZ, os valores variam muito pouco, pois ambos os planos passam pelo centro do tijolo e se estendem até a superfície. Novamente se observa que em $t = 60$ min de processo a variação de temperatura atinge seus valores mais elevados.

Tabela 4-14: Gradientes máximos de temperatura no interior do tijolo (Planos XY e YZ)

| T [°C] | $\Delta T_{\text{máx}}$ [°C] | | | | | |
|--------|------------------------------|------|--------|-------|-------------|--------------------|
| | 10 min | | 60 min | | Tempo final | |
| | Plano | | Plano | | Plano | |
| | XY | YZ | XY | YZ | XY | YZ |
| 50 | 1,32 | 1,3 | 3,33 | 3,68 | 0,5 | 0,59 (t = 990 min) |
| 60 | 1,98 | 1,96 | 4,94 | 5,49 | 0,92 | 1,09 (t = 820 min) |
| 70 | 2,42 | 2,41 | 5,94 | 6,62 | 0,67 | 0,79 (t = 950 min) |
| 80 | 3,49 | 3,49 | 8,44 | 9,45 | 0,93 | 1,11 (t = 900 min) |
| 90 | 4,38 | 4,39 | 10,47 | 11,77 | 1,89 | 2,27 (t = 990 min) |
| 100 | 4,95 | 4,96 | 11,72 | 13,19 | 1,12 | 1,34 (t = 860 min) |

Plano YZ (X = 0 m)

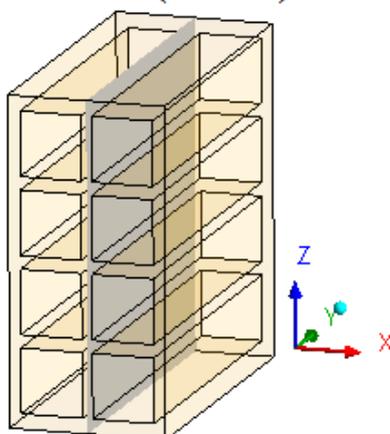
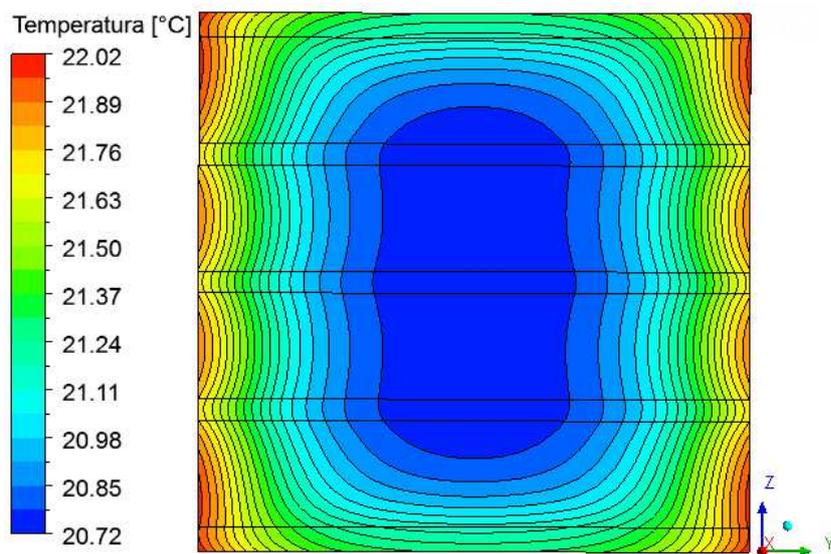
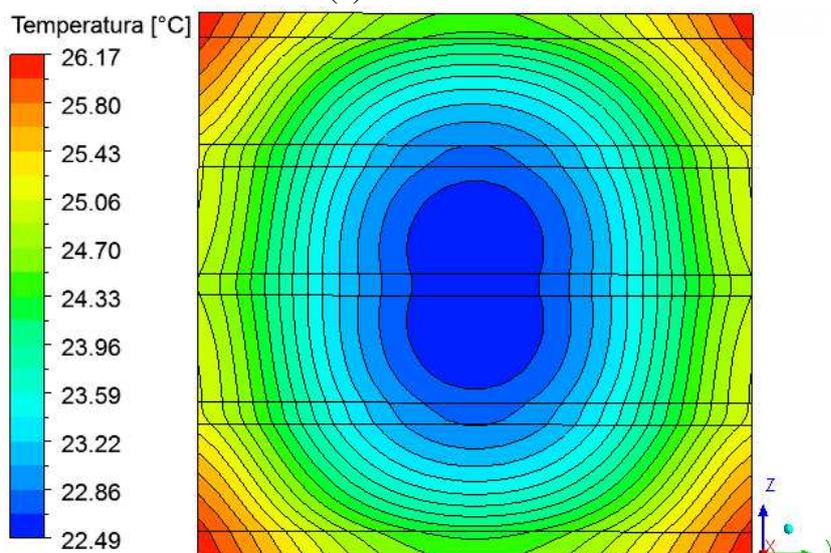


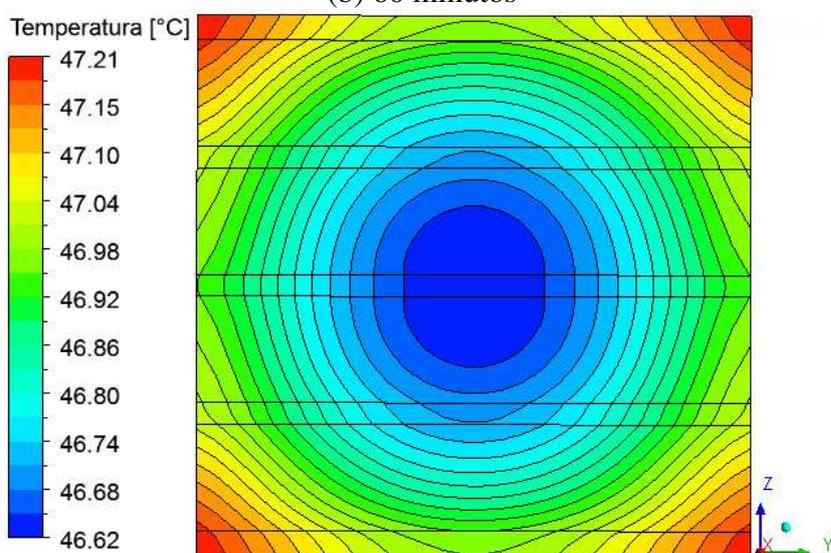
Figura 4.86: Plano YZ.



(a) 10 minutos



(b) 60 minutos



(c) 990 minutos

Figura 4.87: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 50°C.

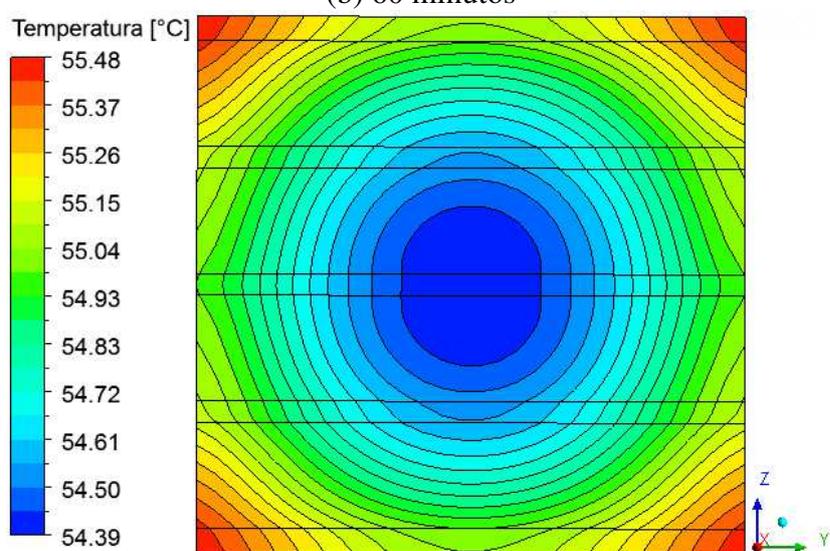
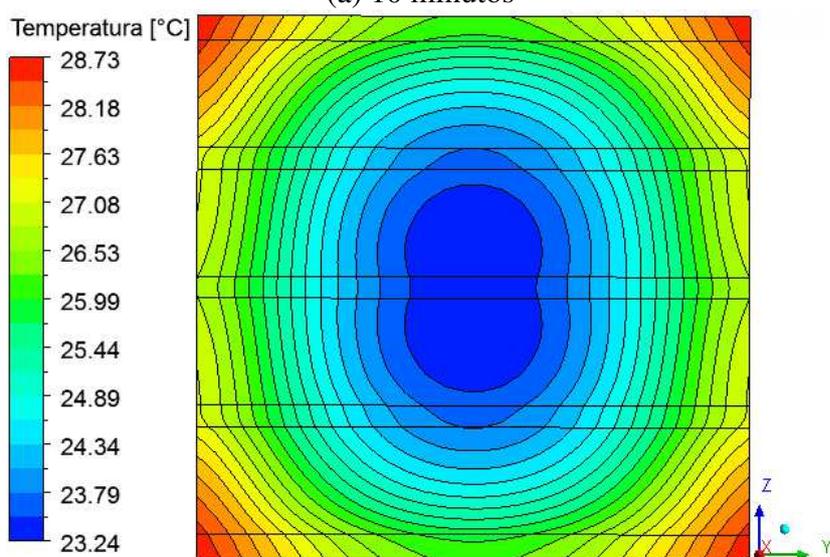
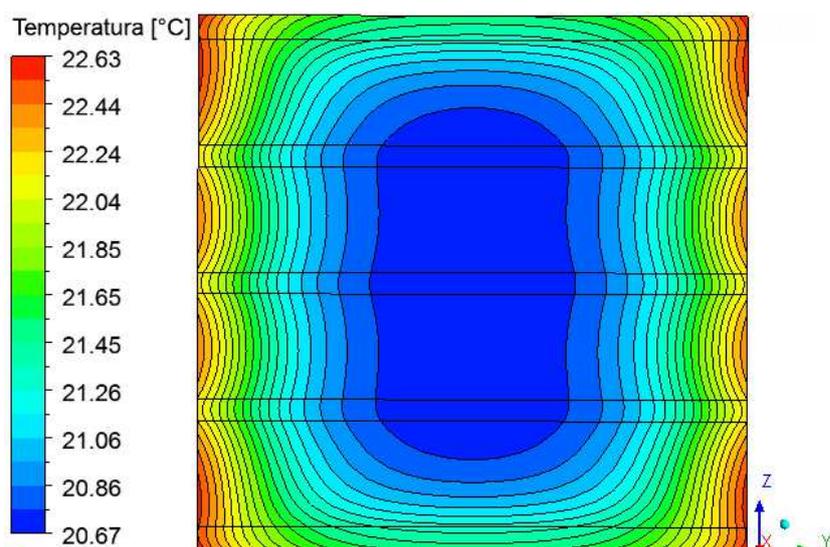
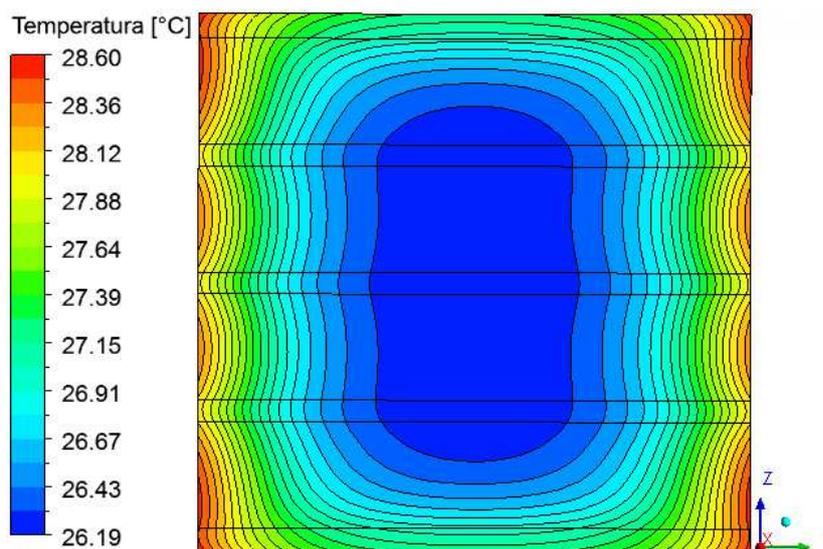
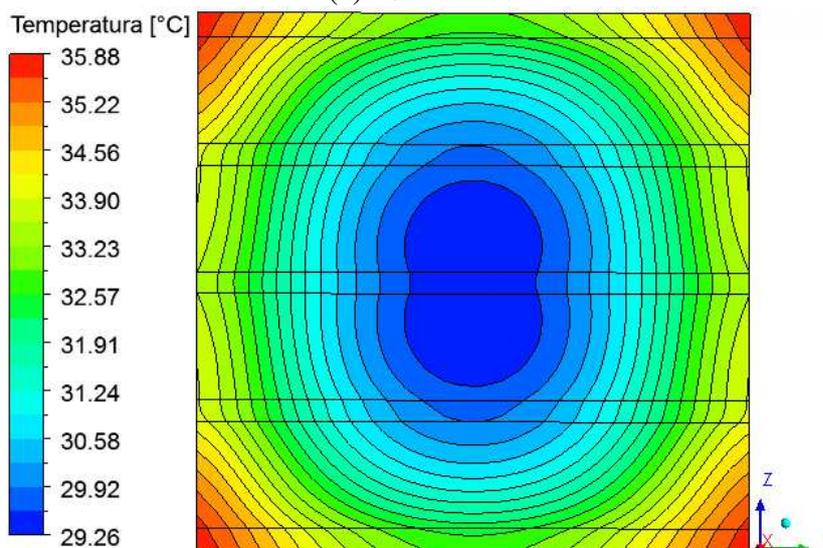


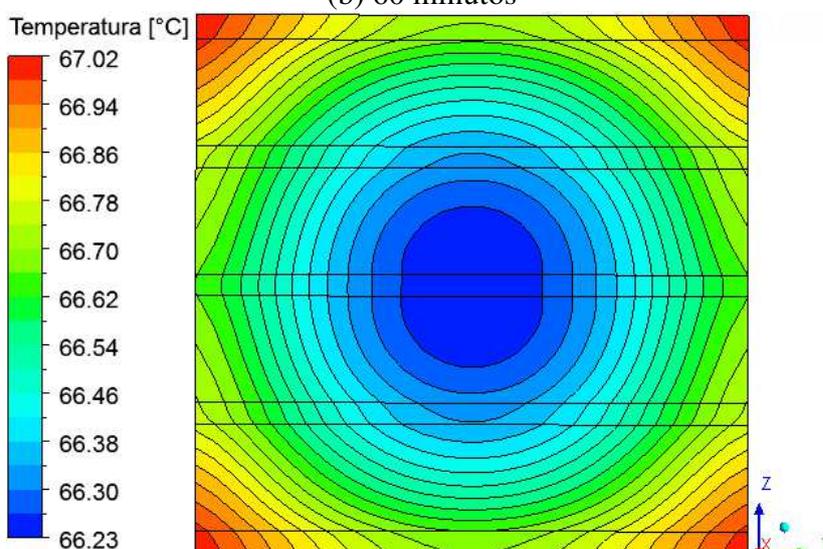
Figura 4.88: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 60°C.



(a) 10 minutos

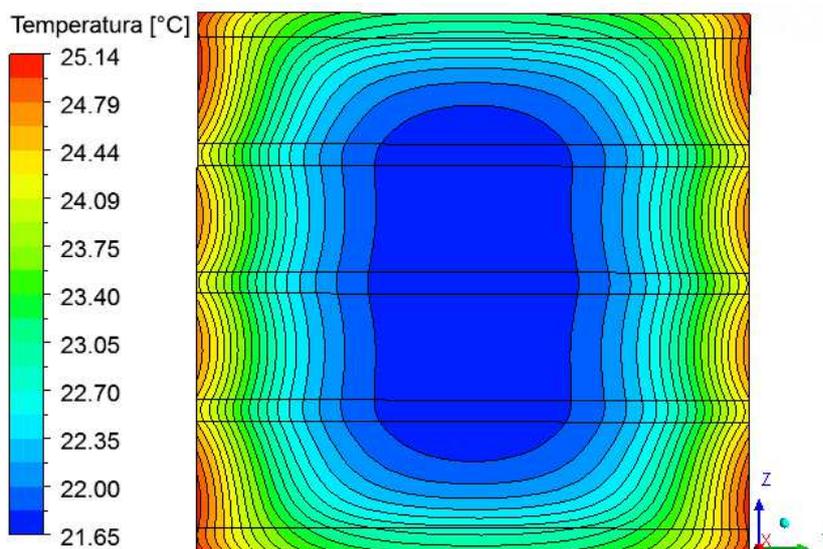


(b) 60 minutos

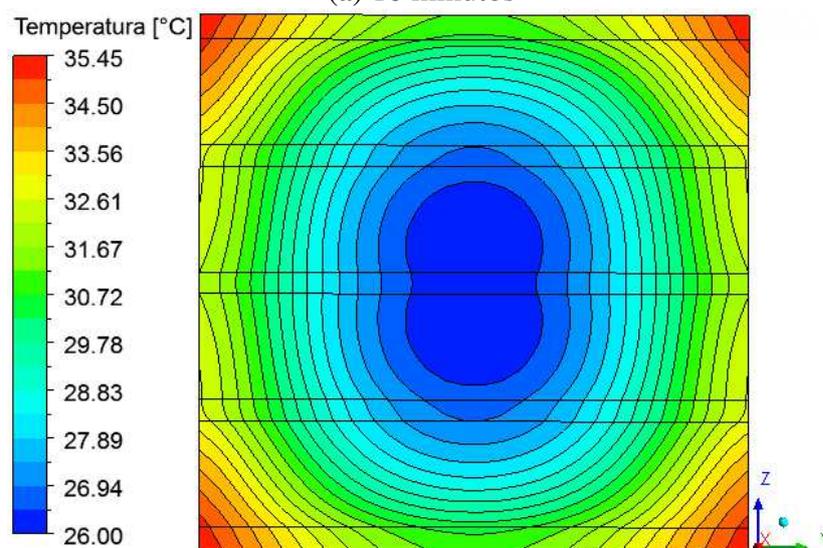


(c) 950 minutos

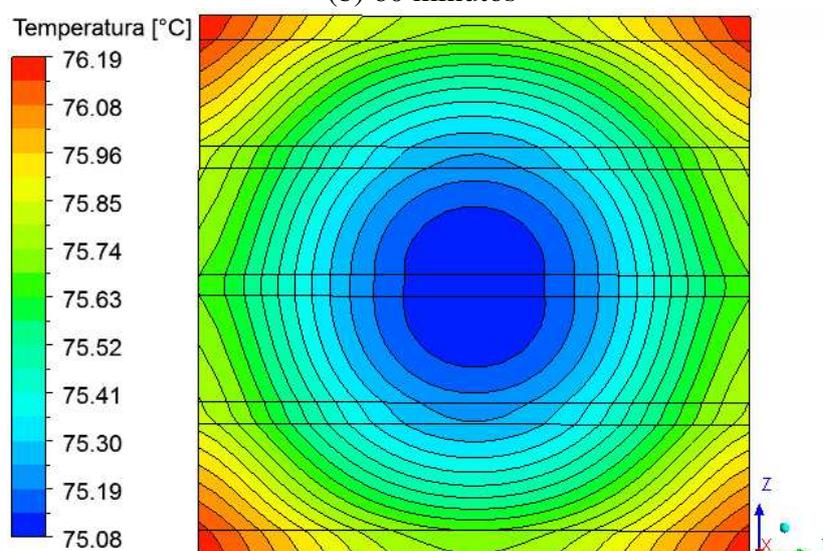
Figura 4.89: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 70°C.



(a) 10 minutos

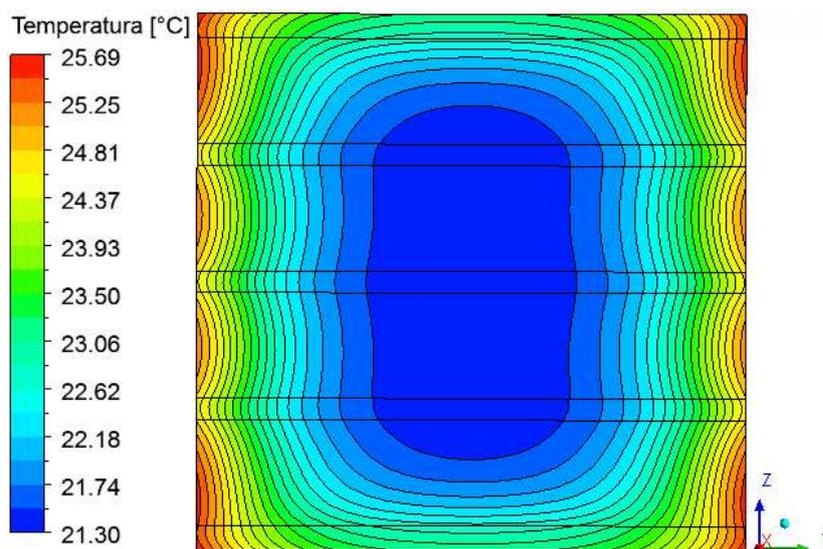


(b) 60 minutos

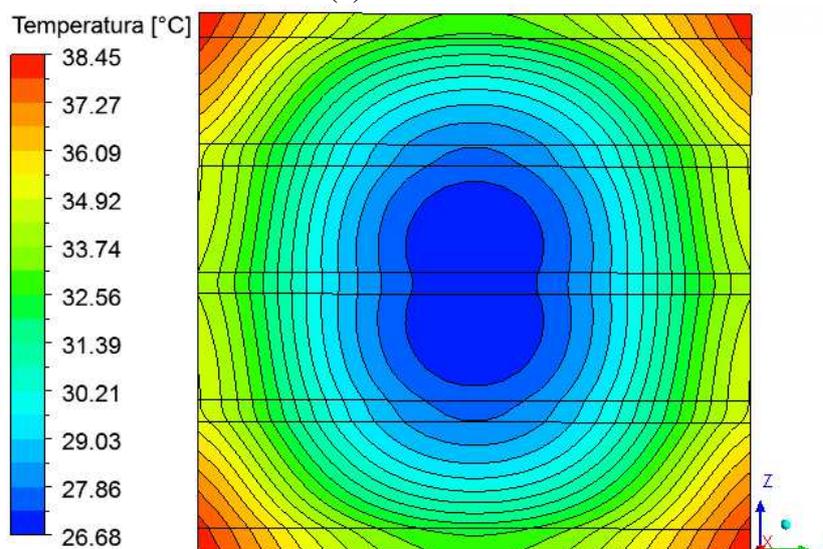


(c) 900 minutos

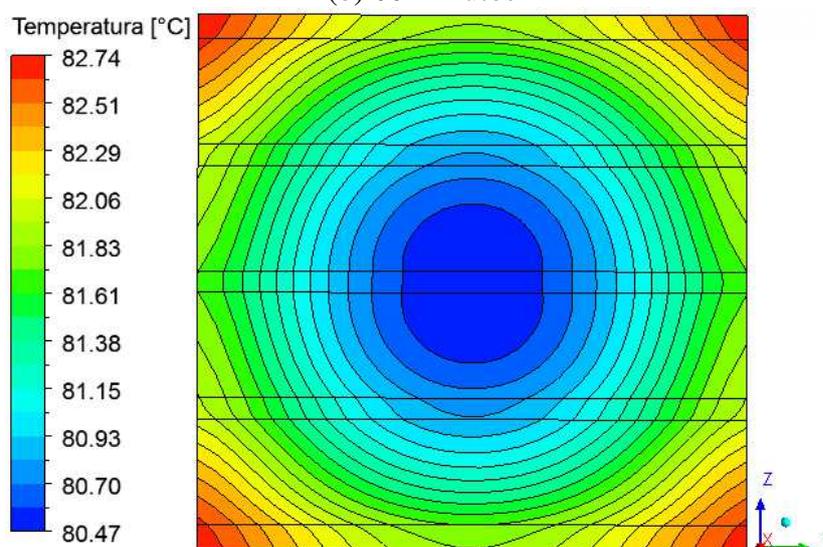
Figura 4.90: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 80°C.



(a) 10 minutos



(b) 60 minutos



(c) 690 minutos

Figura 4.91: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 90°C.

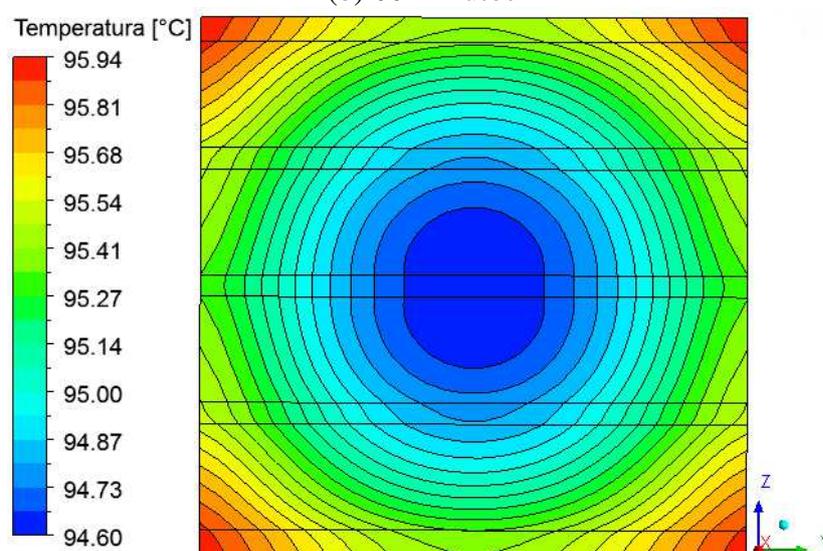
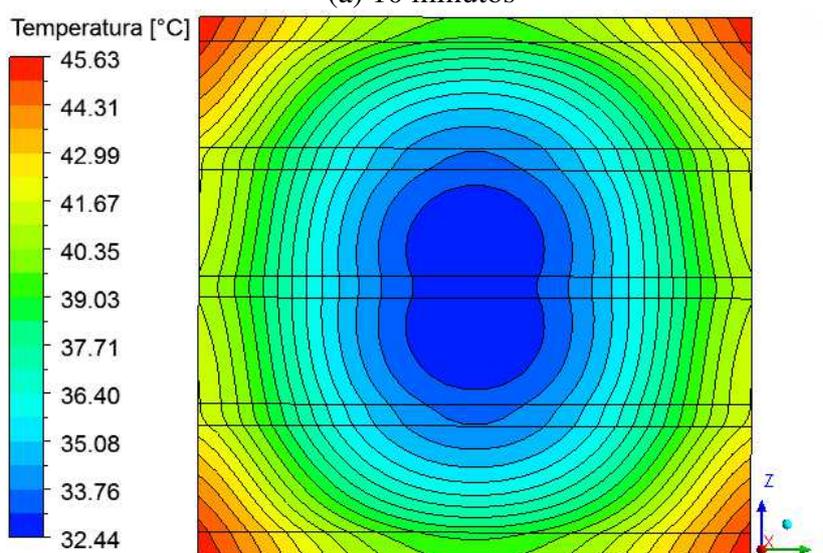
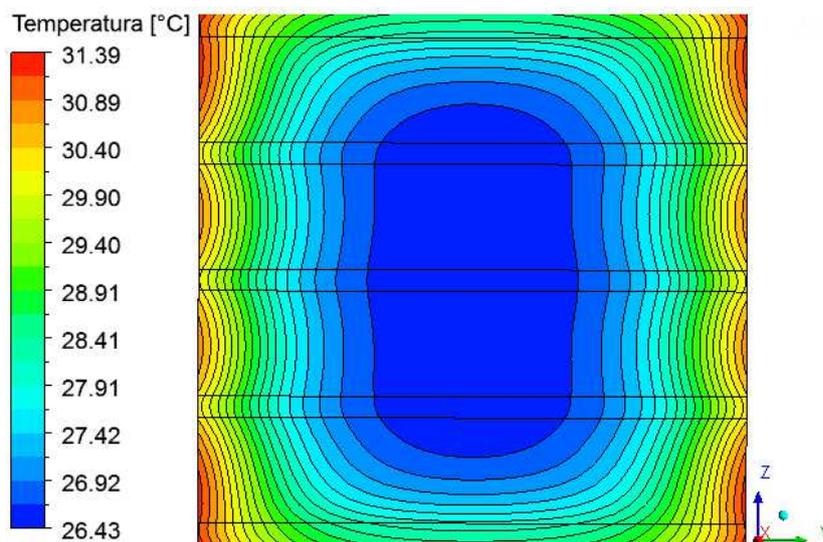


Figura 4.92: Campo de temperatura no interior do tijolo (Plano YZ) para a secagem a 100°C.

4.2.4 Campo do teor de umidade no tijolo

A direção de escoamento do ar influencia diretamente na distribuição da umidade sobre a superfície do material no processo de secagem. Esta influência só é possível de ser investigada em simulações numéricas que incluem o meio externo ao domínio sólido/poroso.

Para examinar a distribuição de umidade sobre a superfície do tijolo, foram representados os campos do teor de umidade (Figuras 4.93 a 4.98).

Devido ao escoamento do ar de secagem ocorrer da direita para a esquerda (perpendicular ao plano ZY), nota-se que os vértices superiores e inferiores do lado direito do tijolo, que é o lado que está em contato direto com o ar de secagem, seca mais rápido em comparação com as outras regiões do material. Se a prateleira onde repousa o tijolo estivesse presente na simulação, seria esperado que os vértices superiores da direita do tijolo secassem mais rápido que os vértices inferiores do lado direito, pois em torno da região inferior o ar estaria escoando com menor velocidade.

Nota-se também que a superfície que caracteriza a região vazada do tijolo cerâmico permanece mais úmida que as demais, onde em tópicos mais adiante observar-se-á que este fato ocorre devido à baixa velocidade de escoamento do ar nessa região em comparação às demais regiões da estufa. Esta diferença na umidade é percebida ao longo de todo o processo de secagem.

Um giro de 90 graus do tijolo cerâmico em torno do eixo Z favoreceria o escoamento do ar na região vazada, e isto diminuiria a diferença entre a umidade observada na superfície dessa região e as demais superfícies do material.

Desta forma, devido a posição do material dentro da estufa, nota-se a ocorrência de uma secagem assimétrica. Em simulações onde se considera apenas o domínio do tijolo cerâmico, como em Cadé *et al.* (2005), Silva (2009), Silva *et al.* (2011), Silva *et al.* (2013) e Shokouhmand *et al.* (2014), não é possível observar a assimetria. A desumidificação assimétrica é importante de ser estudada, pois ela pode provocar defeitos nos tijolos durante sua queima, como por exemplo trincas e deformações.

Note que, assim como observado para temperatura, as maiores variações de umidade ocorrem na primeira hora do processo. Na secagem a 50°C, por exemplo, o $\Delta M_{\text{máx}}$ é de $31,9 \times 10^{-3}$ g/g em $t = 10$ min. No instante de $t = 60$ min, o $\Delta M_{\text{máx}}$ sobe para $72,9 \times 10^{-3}$ g/g. No final da secagem, em $t = 990$ min, o $\Delta M_{\text{máx}}$ decresce para $3,6 \times 10^{-3}$ g/g.

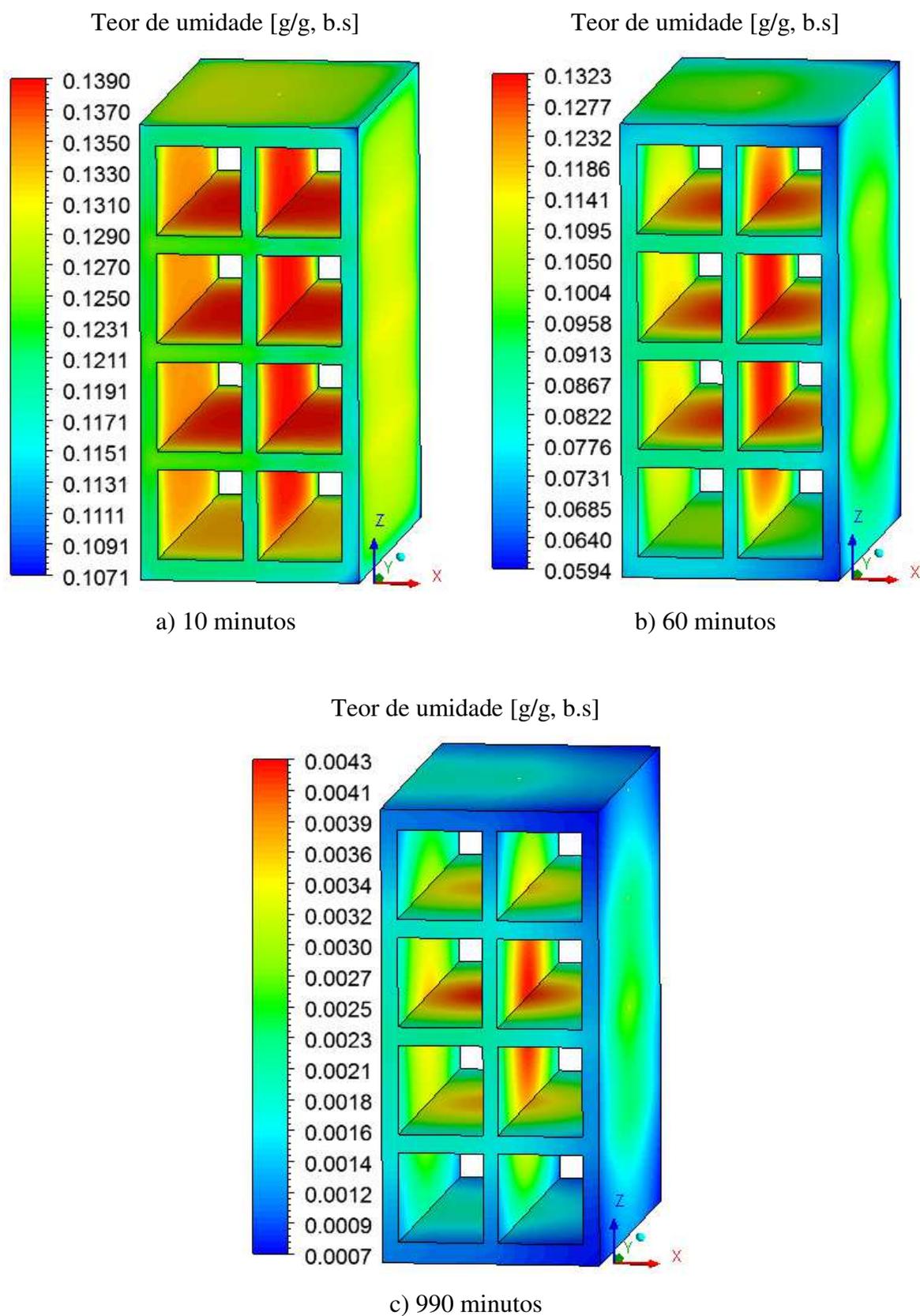


Figura 4.93: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 50°C.

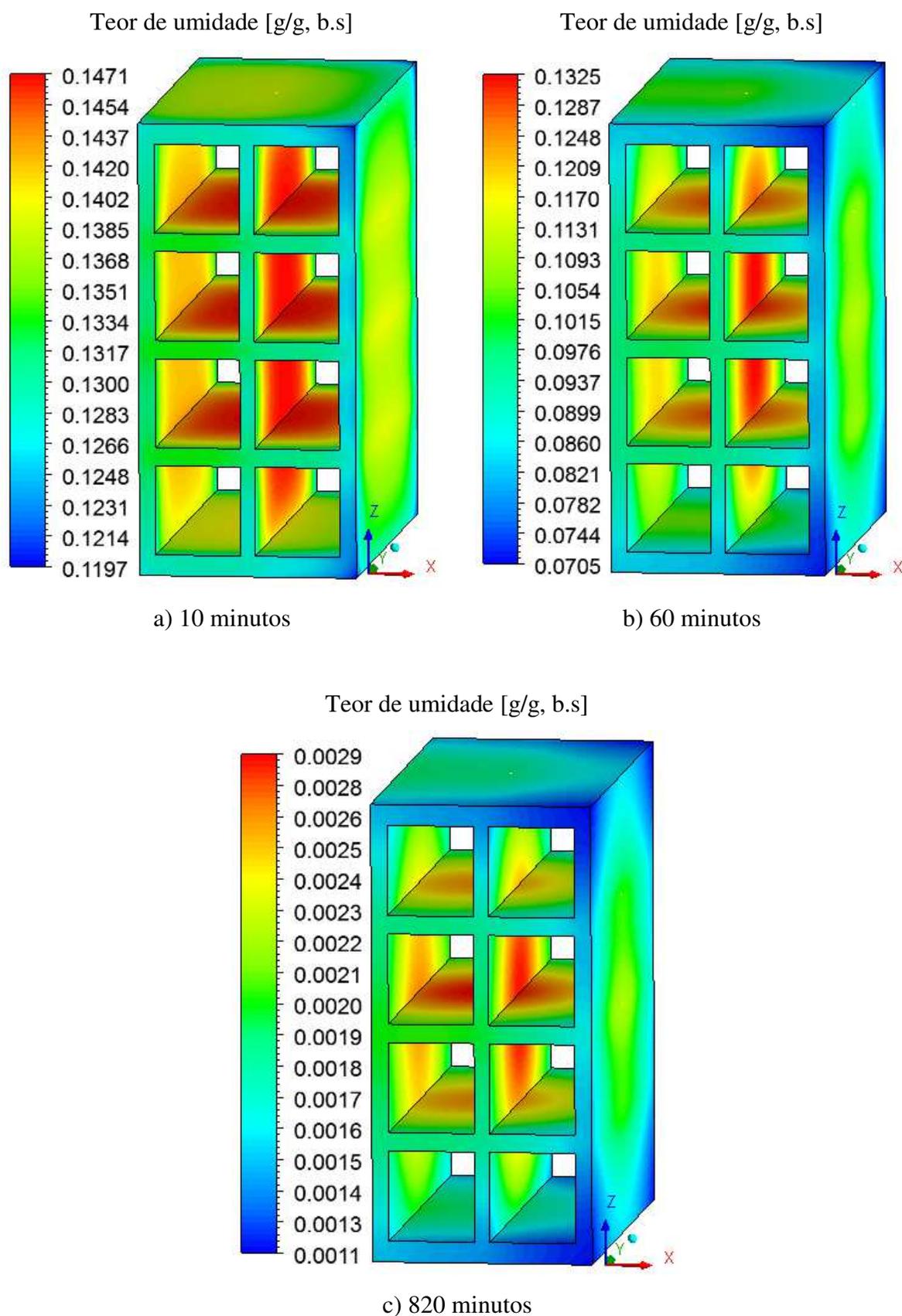


Figura 4.94: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 60°C.

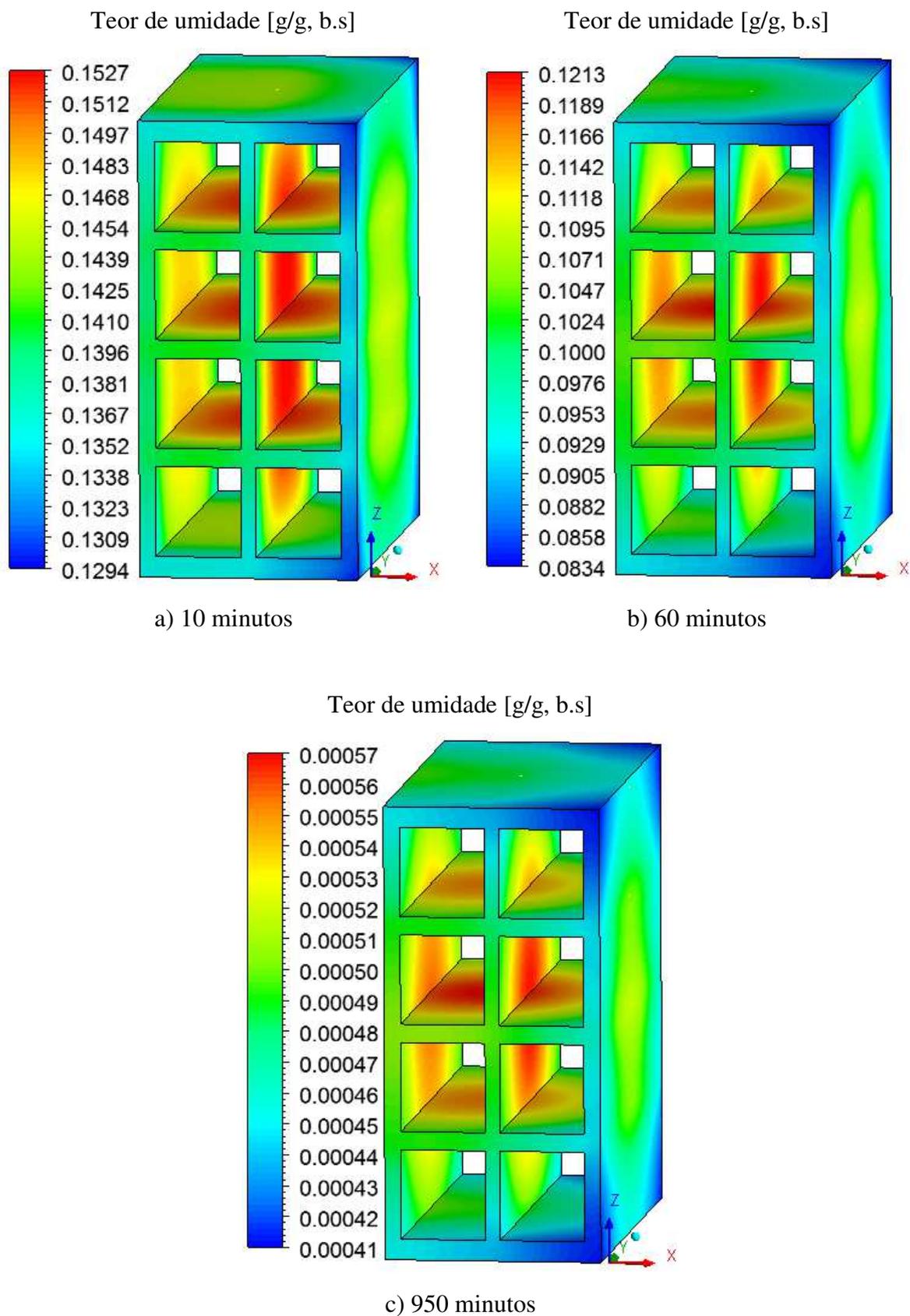


Figura 4.95: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 70°C.

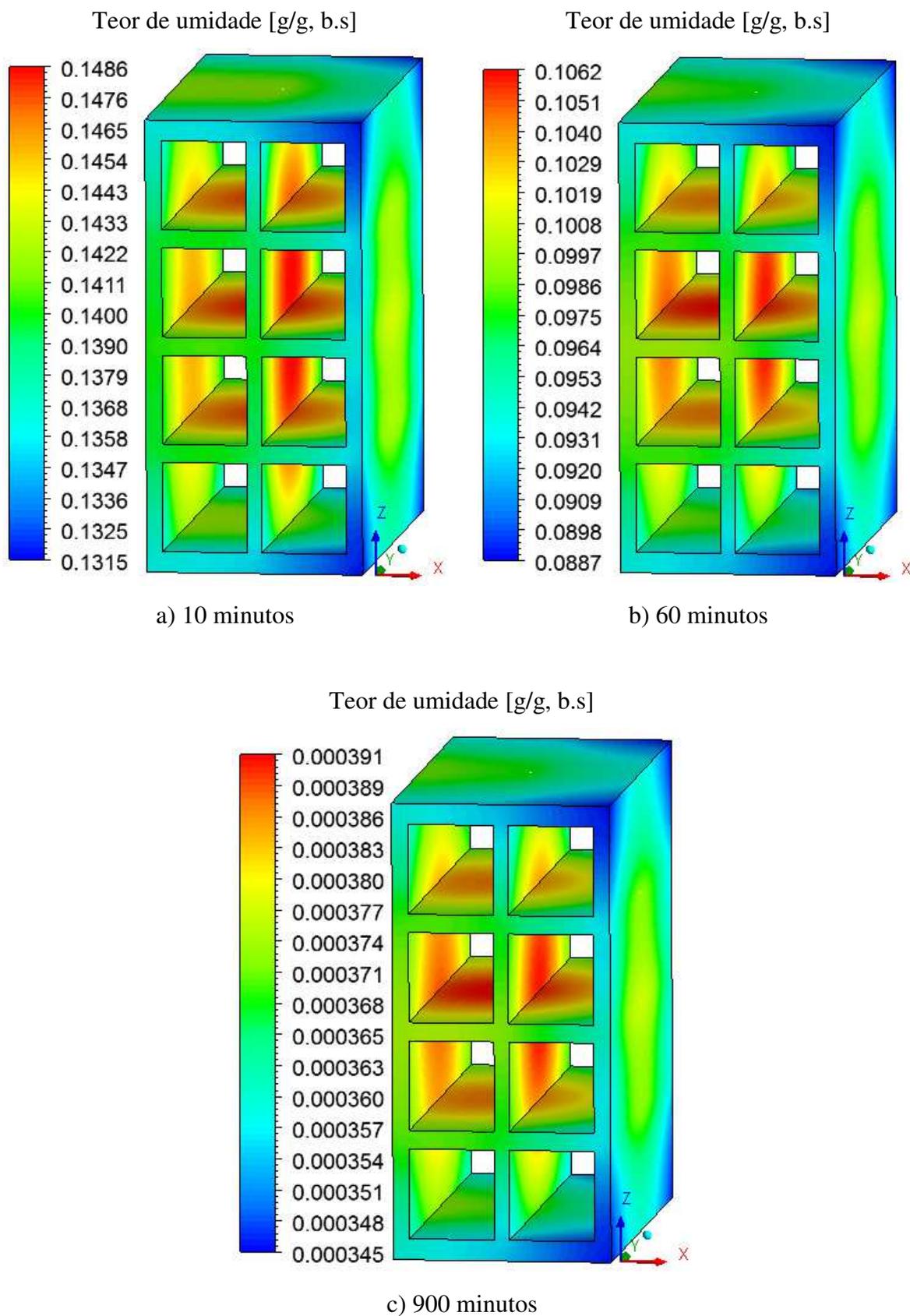


Figura 4.96: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 80°C.

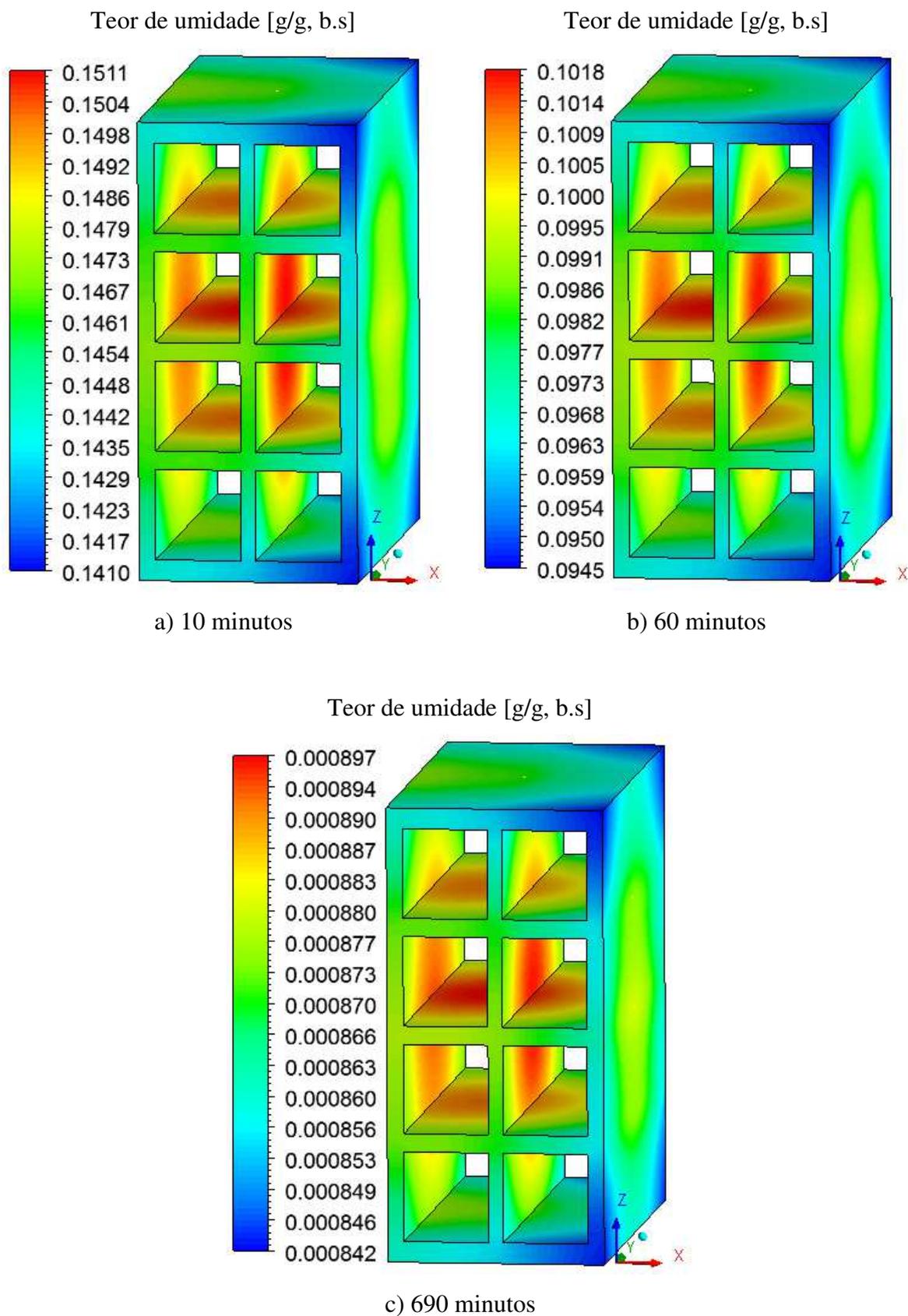


Figura 4.97: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 90°C.

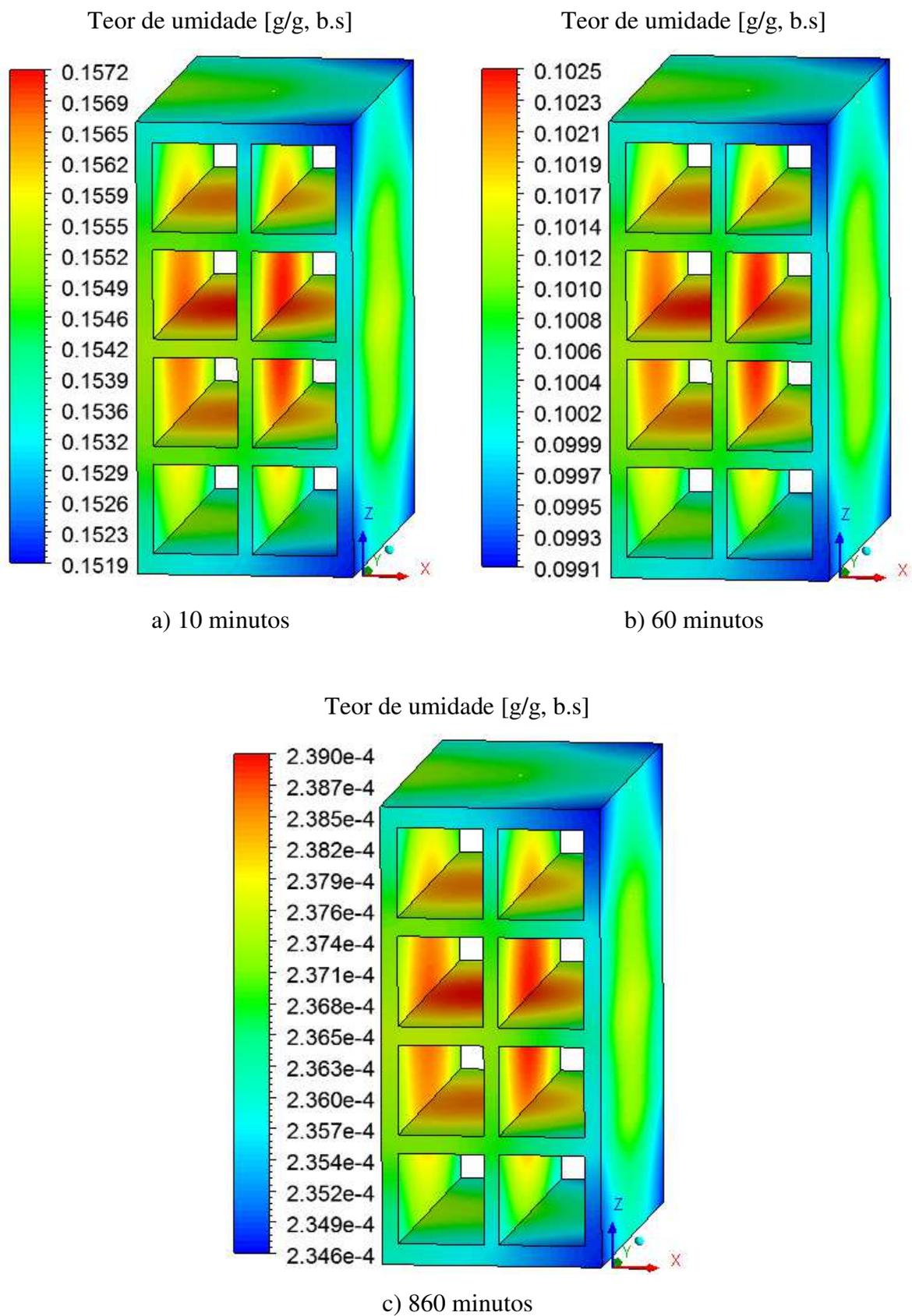


Figura 4.98: Campo do teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 100°C.

O campo do teor de umidade no interior do tijolo é ilustrado nas Figuras 4.99 a 4.104 (plano XZ, em $Y = 0,1$ m), Figuras 4.105 a 4.110 ((plano XY, em $Z = 0,0985$ m) e Figuras 4.111 a 4.116 (plano YZ, em $X = 0$ m conforme Figura 4.86).

A Tabela 4-15 expõe a variação do teor de umidade máxima obtida a partir das figuras citadas anteriormente. Considerando o campo sobre o plano XZ, para as secagens de 50 a 80°C, a variação entre o teor de umidade máximo e mínimo observada cresce entre os instantes de 10 a 60 min, apresentando valores inferiores nos instantes finais. Com relação ao plano XY, a elevação do ΔM seguida da diminuição ocorre nas temperaturas de 60 e 70°C, enquanto que nas demais temperaturas as variações do teor de umidade foram decrescentes nos três instantes de tempo. Avaliando o campo sobre o plano YZ, a elevação da variação do teor de umidade seguida de uma diminuição ocorreu nas temperaturas de 50 a 80°C, ao passo que nas temperaturas de 90 e 100°C, os valores da variação do teor de umidade é decrescente nos três instantes de tempo.

Tabela 4-15: Gradientes máximos do teor de umidade no interior do tijolo (Planos XZ, XY e YZ)

| T [°C] | $\Delta M_{\text{máx}}$ [g/g, b.s.] | | | | | | | | |
|-----------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|
| | 10 min | | | 60 min | | | Tempo final | | |
| | Plano | | | Plano | | | Plano | | |
| | XZ | XY | YZ | XZ | XY | YZ | XZ | XY | YZ |
| 50 | 21×10^{-3} | 22×10^{-3} | 22×10^{-3} | 52×10^{-3} | $5,9 \times 10^{-3}$ | 59×10^{-3} | $3,1 \times 10^{-3}$ | $2,9 \times 10^{-3}$ | $3,3 \times 10^{-3}$ (t = 990 min) |
| 60 | 18×10^{-3} | 20×10^{-3} | 20×10^{-3} | 44×10^{-3} | 48×10^{-3} | 52×10^{-3} | $1,4 \times 10^{-3}$ | $1,3 \times 10^{-3}$ | $1,0 \times 10^{-3}$ (t = 820 min) |
| 70 | 15×10^{-3} | 17×10^{-3} | 18×10^{-3} | 27×10^{-3} | 27×10^{-3} | 31×10^{-3} | $1,2 \times 10^{-4}$ | $1,1 \times 10^{-4}$ | $1,2 \times 10^{-4}$ (t = 950 min) |
| 80 | 11×10^{-3} | 13×10^{-3} | $13,6 \times 10^{-3}$ | 12×10^{-3} | 11×10^{-3} | $14,2 \times 10^{-3}$ | $3,2 \times 10^{-5}$ | $3,1 \times 10^{-5}$ | $3,7 \times 10^{-5}$ (t = 900 min) |
| 90 | $6,8 \times 10^{-3}$ | $6,9 \times 10^{-3}$ | $8,0 \times 10^{-3}$ | $5,1 \times 10^{-3}$ | $4,9 \times 10^{-3}$ | $5,8 \times 10^{-3}$ | $3,8 \times 10^{-5}$ | $3,6 \times 10^{-5}$ | $4,3 \times 10^{-5}$ (t = 990 min) |
| 100 | $3,7 \times 10^{-3}$ | $3,5 \times 10^{-3}$ | $4,2 \times 10^{-3}$ | $2,4 \times 10^{-3}$ | $2,3 \times 10^{-3}$ | $2,7 \times 10^{-3}$ | $3,1 \times 10^{-6}$ | $2,9 \times 10^{-6}$ | 3×10^{-6} (t = 860 min) |

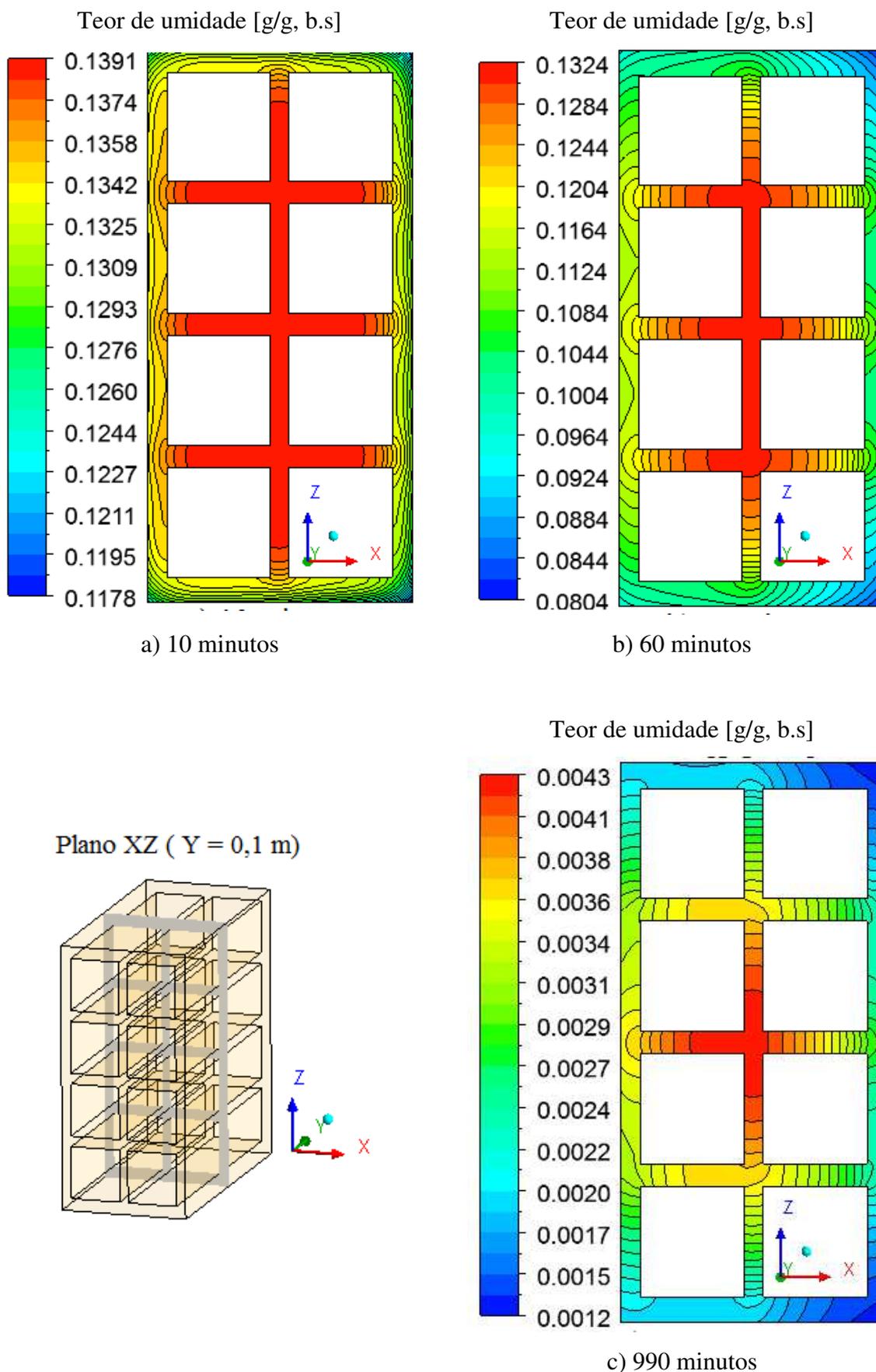


Figura 4.99: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 50°C.

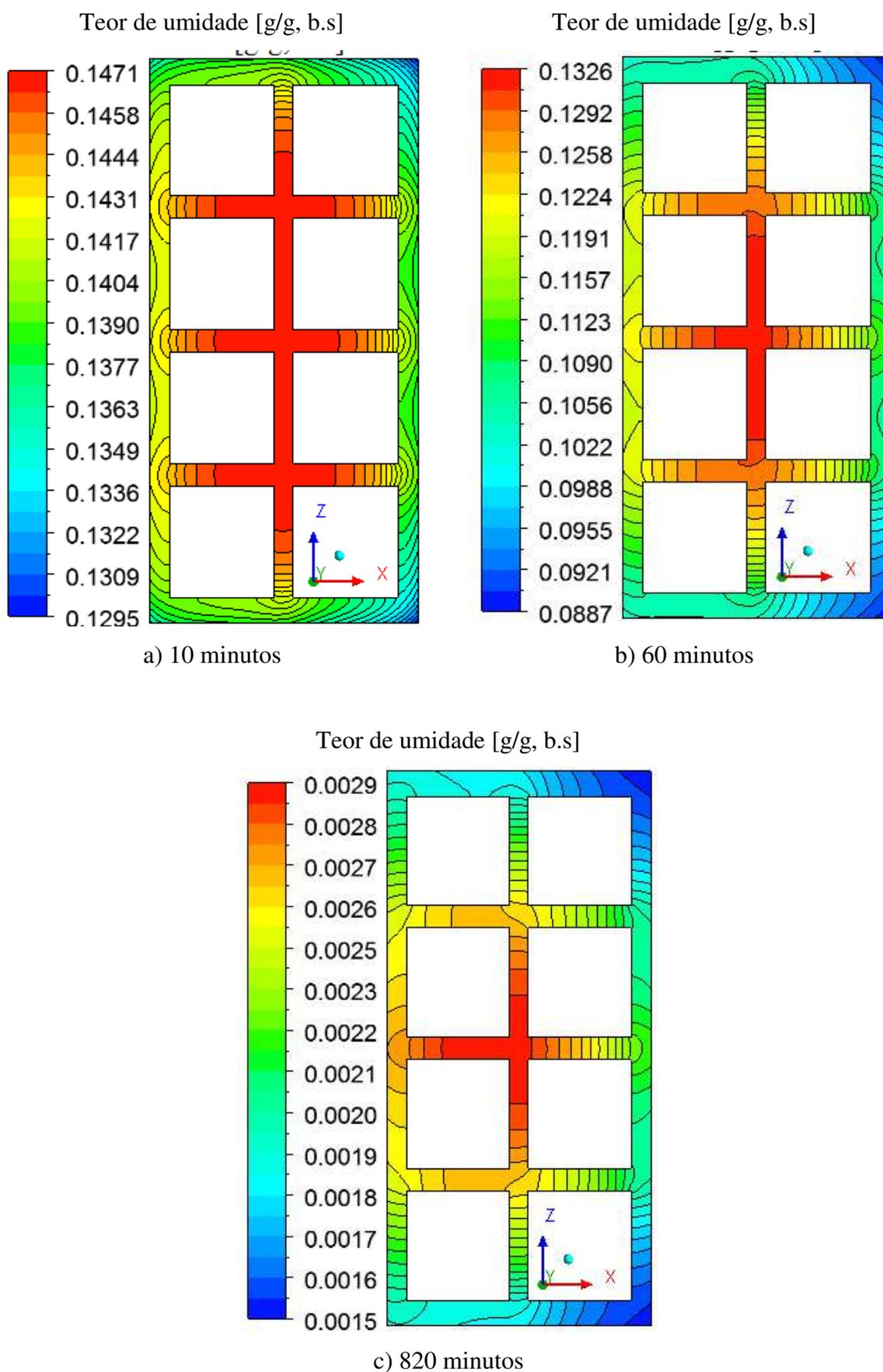


Figura 4.100: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 60°C.

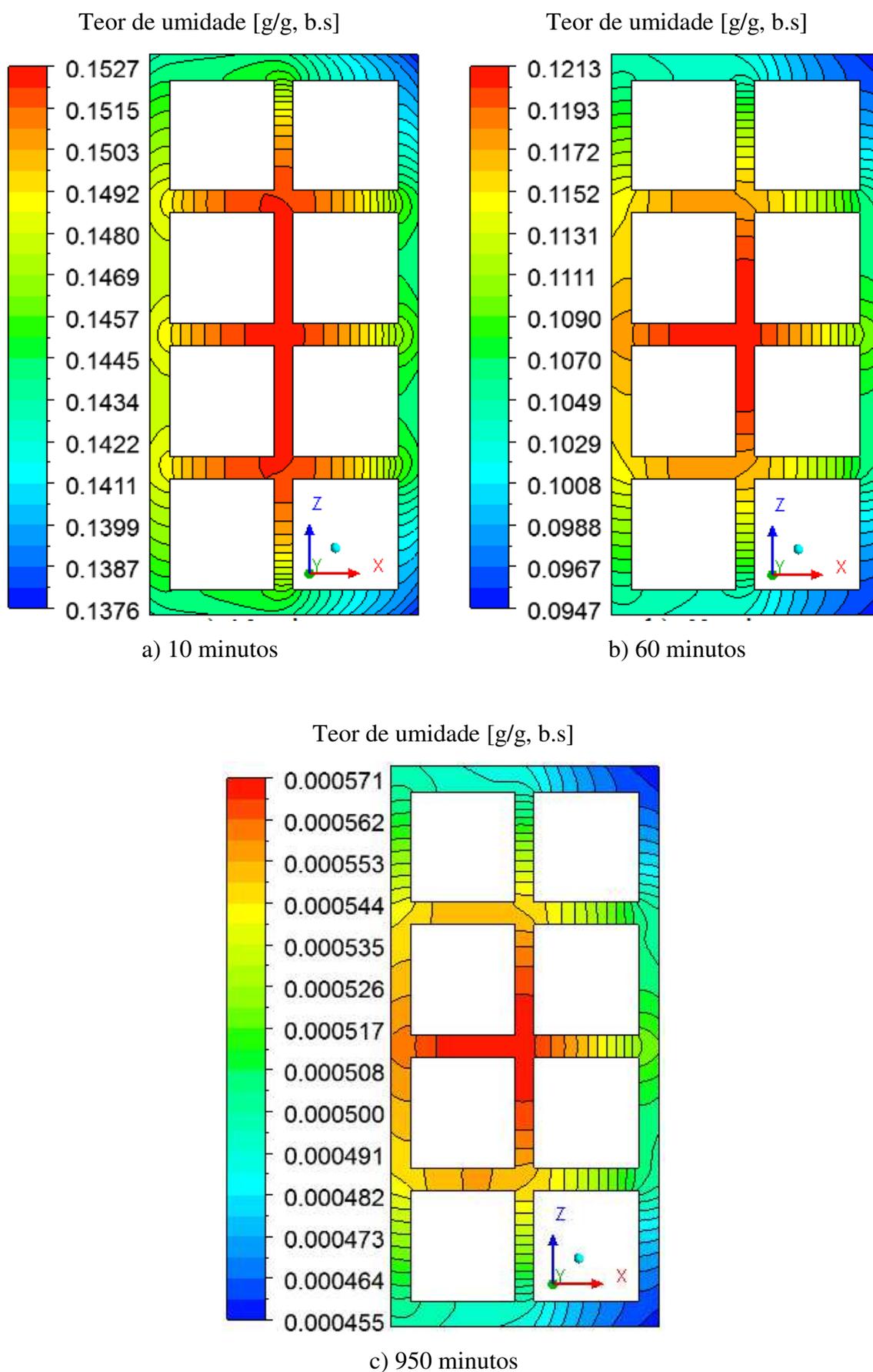


Figura 4.101: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 70°C.

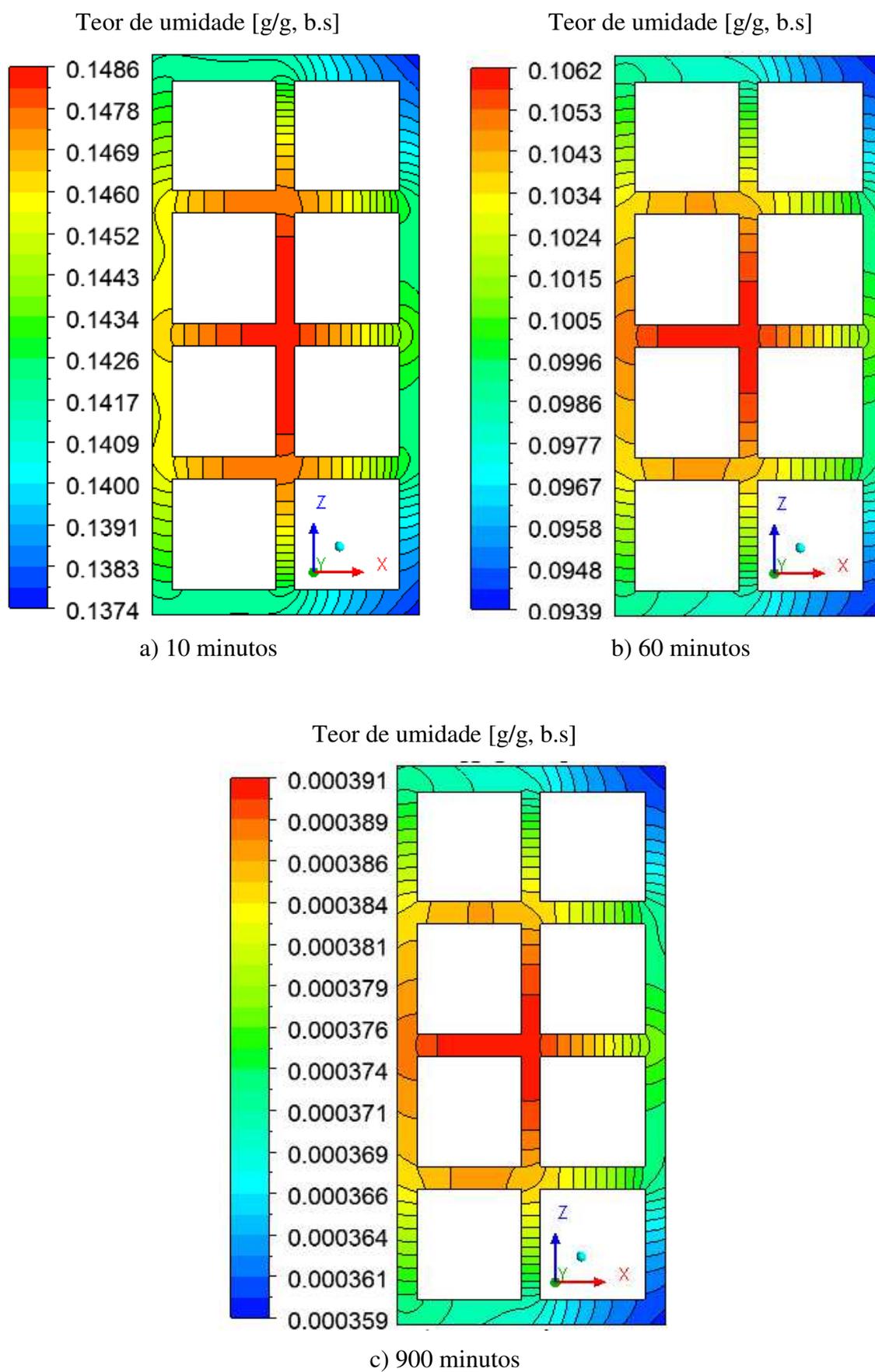


Figura 4.102: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 80°C.

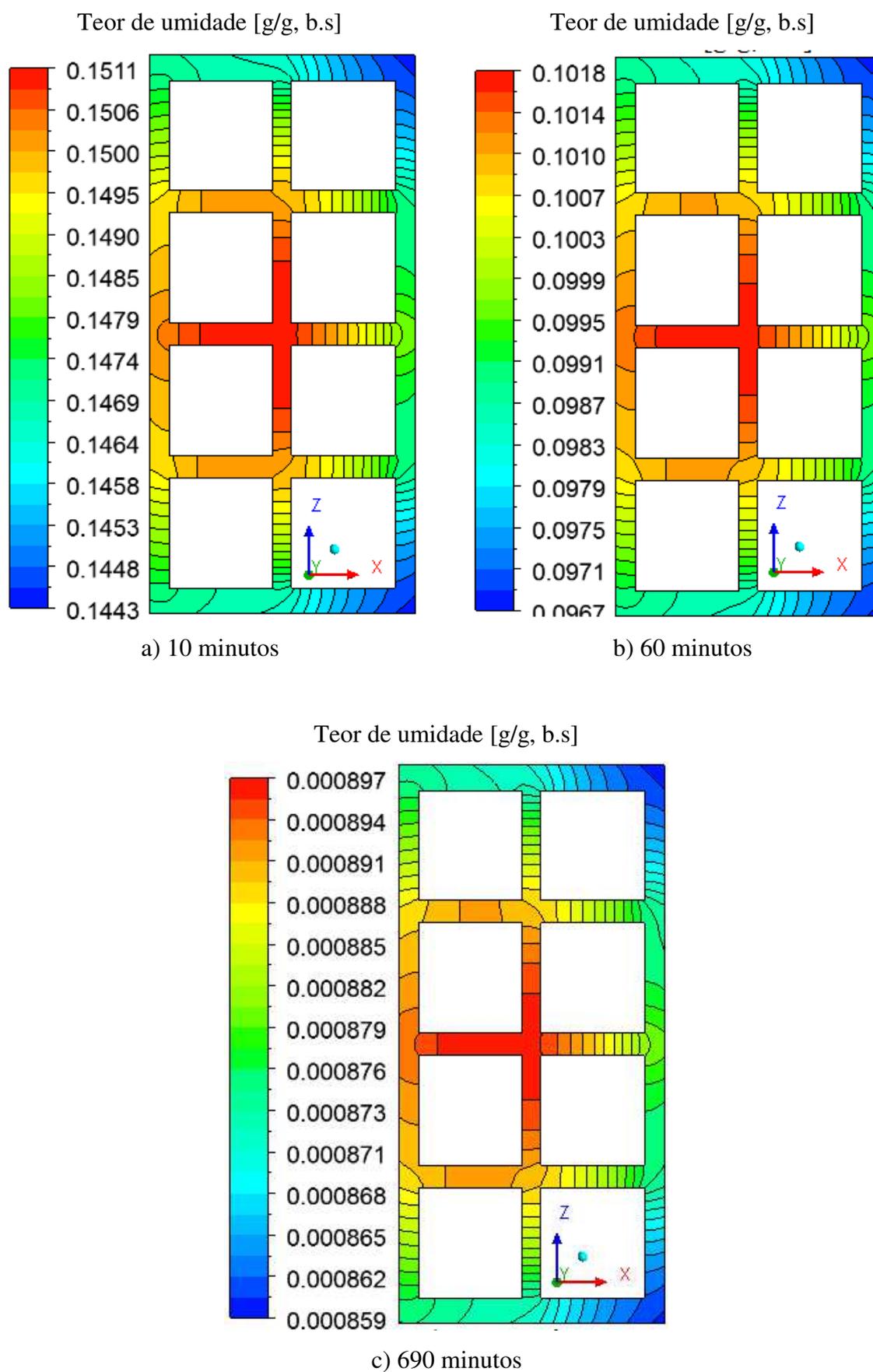


Figura 4.103: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 90°C.

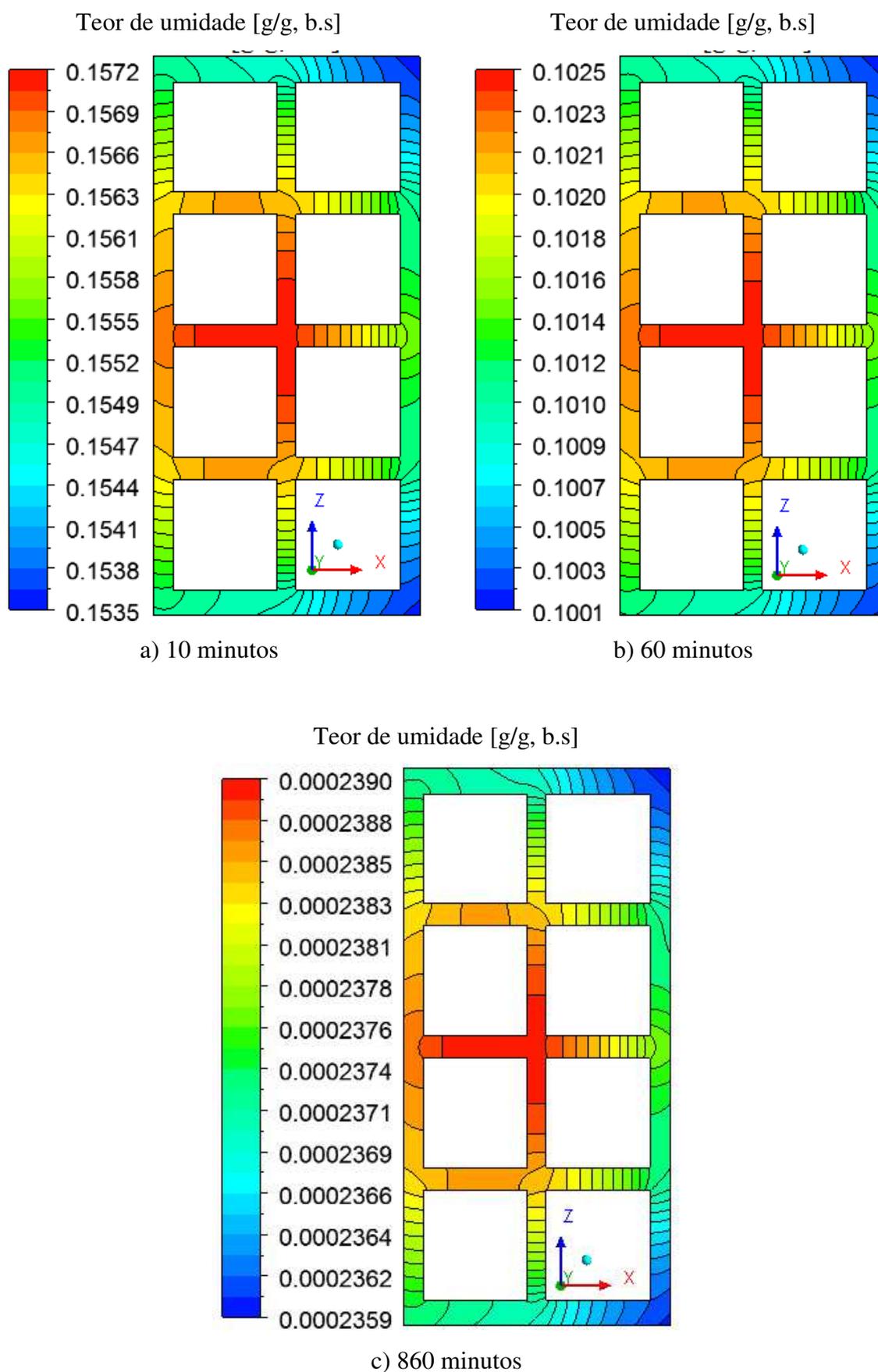


Figura 4.104: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XZ) para a secagem a 100°C.

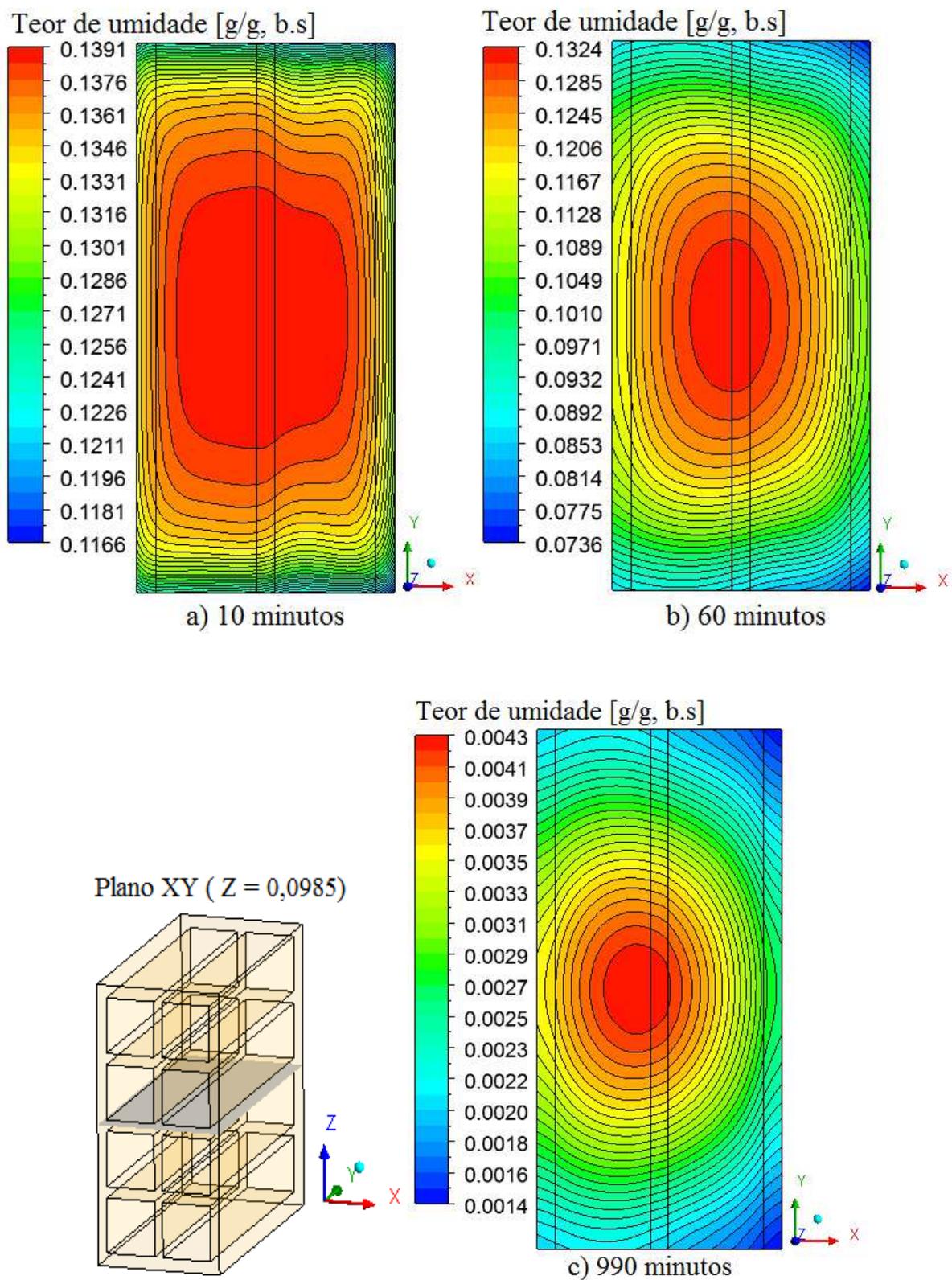


Figura 4.105: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 50°C.

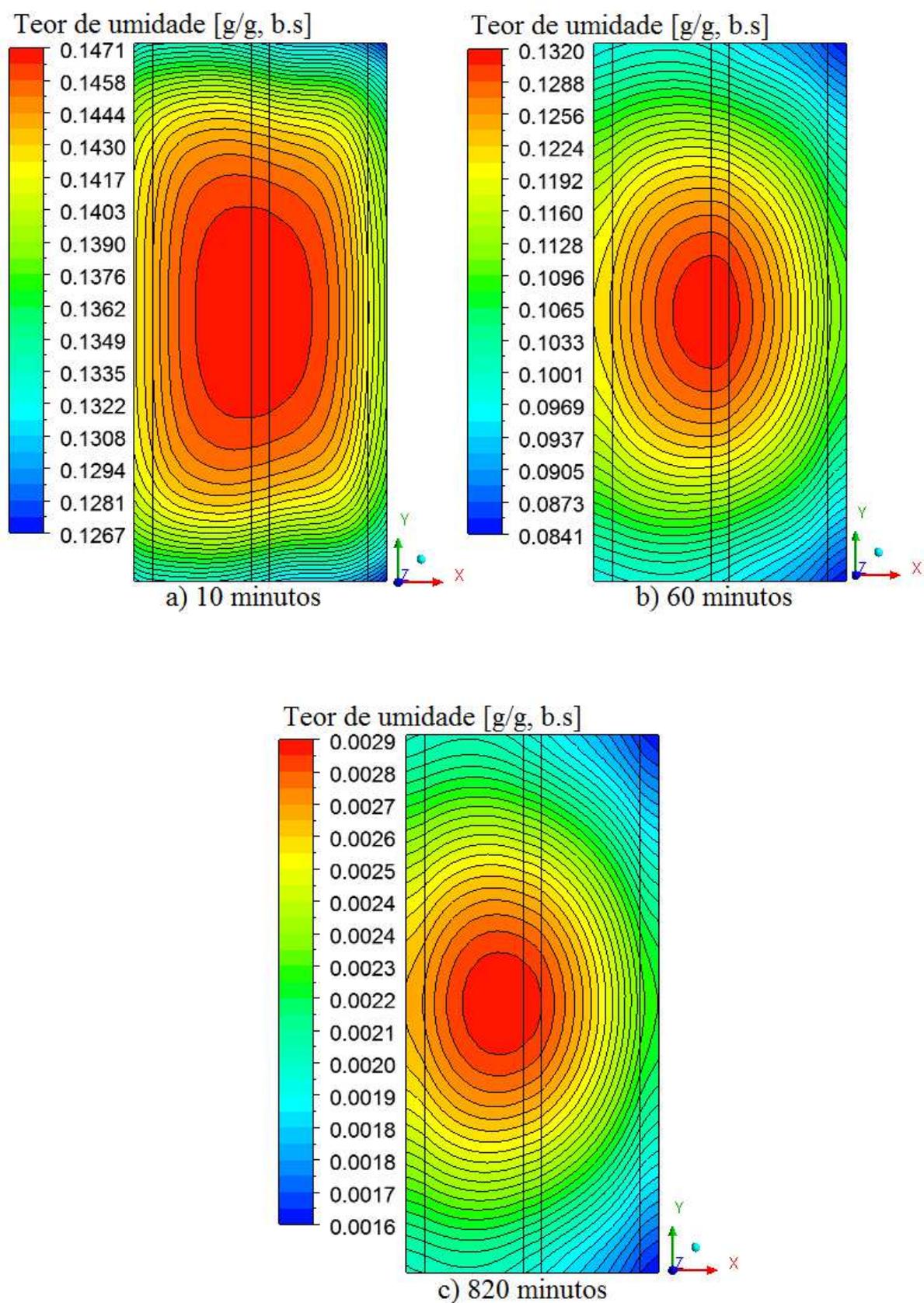


Figura 4.106: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 60°C.

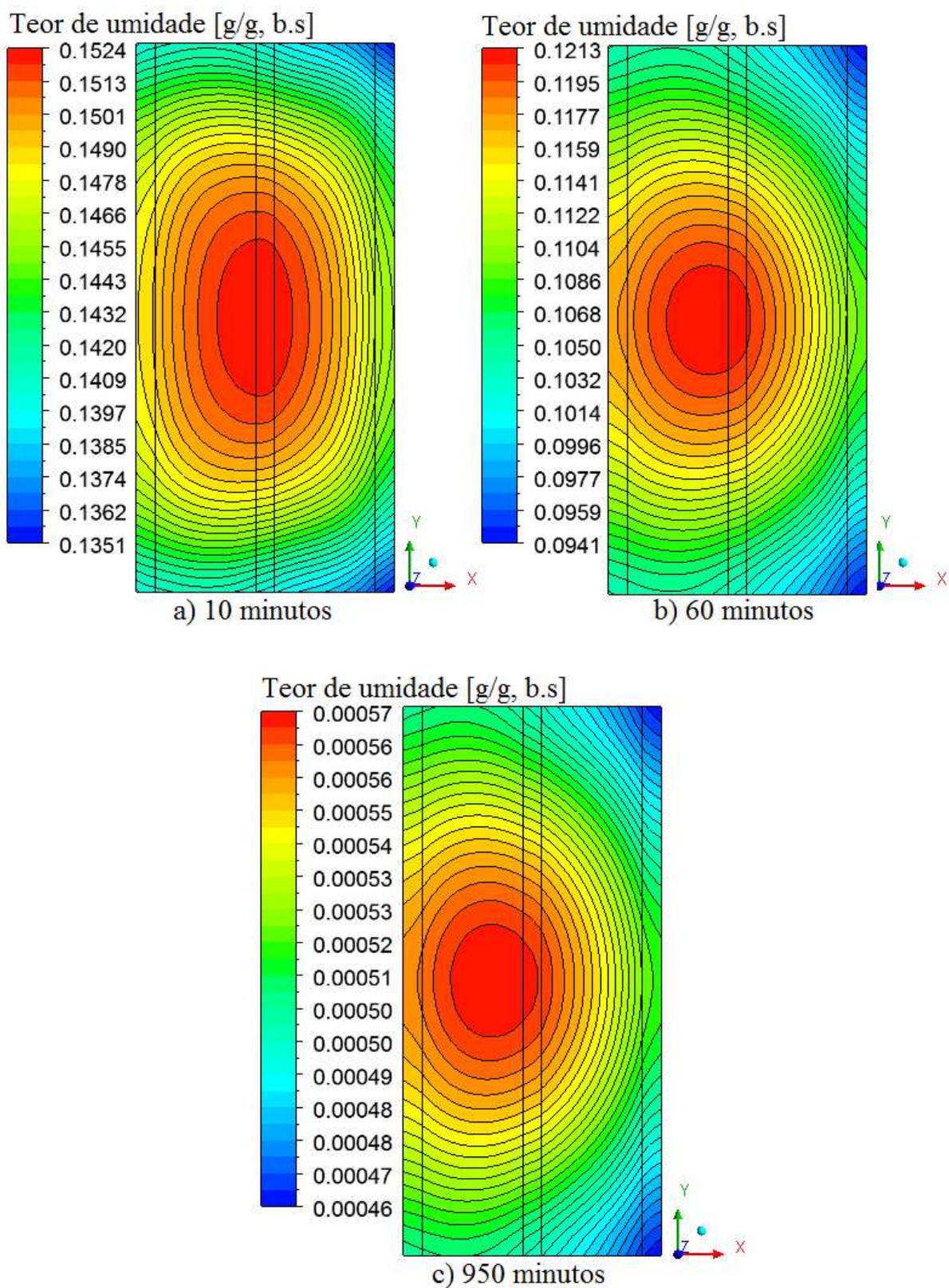


Figura 4.107: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 70°C.

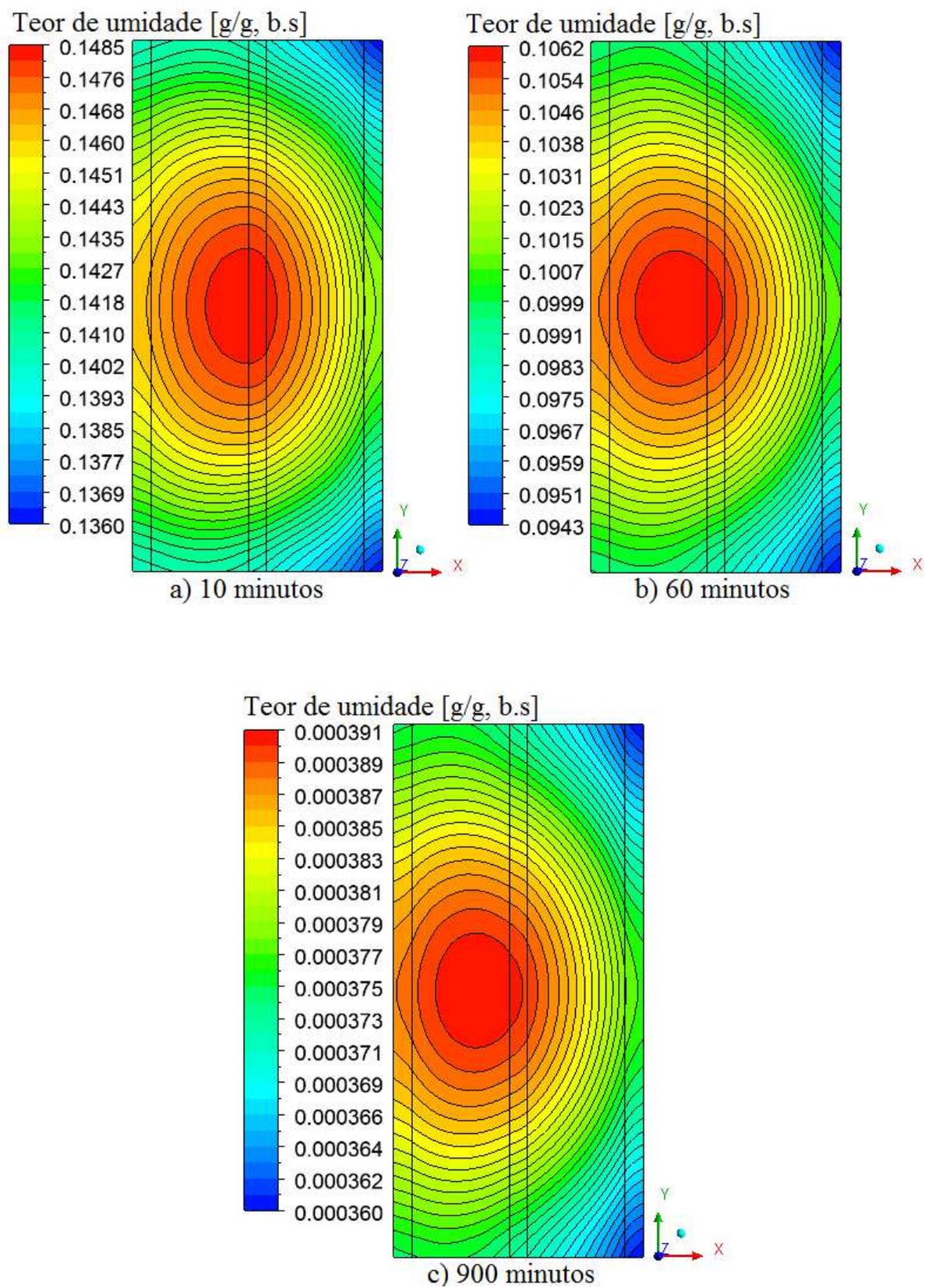


Figura 4.108: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 80°C.

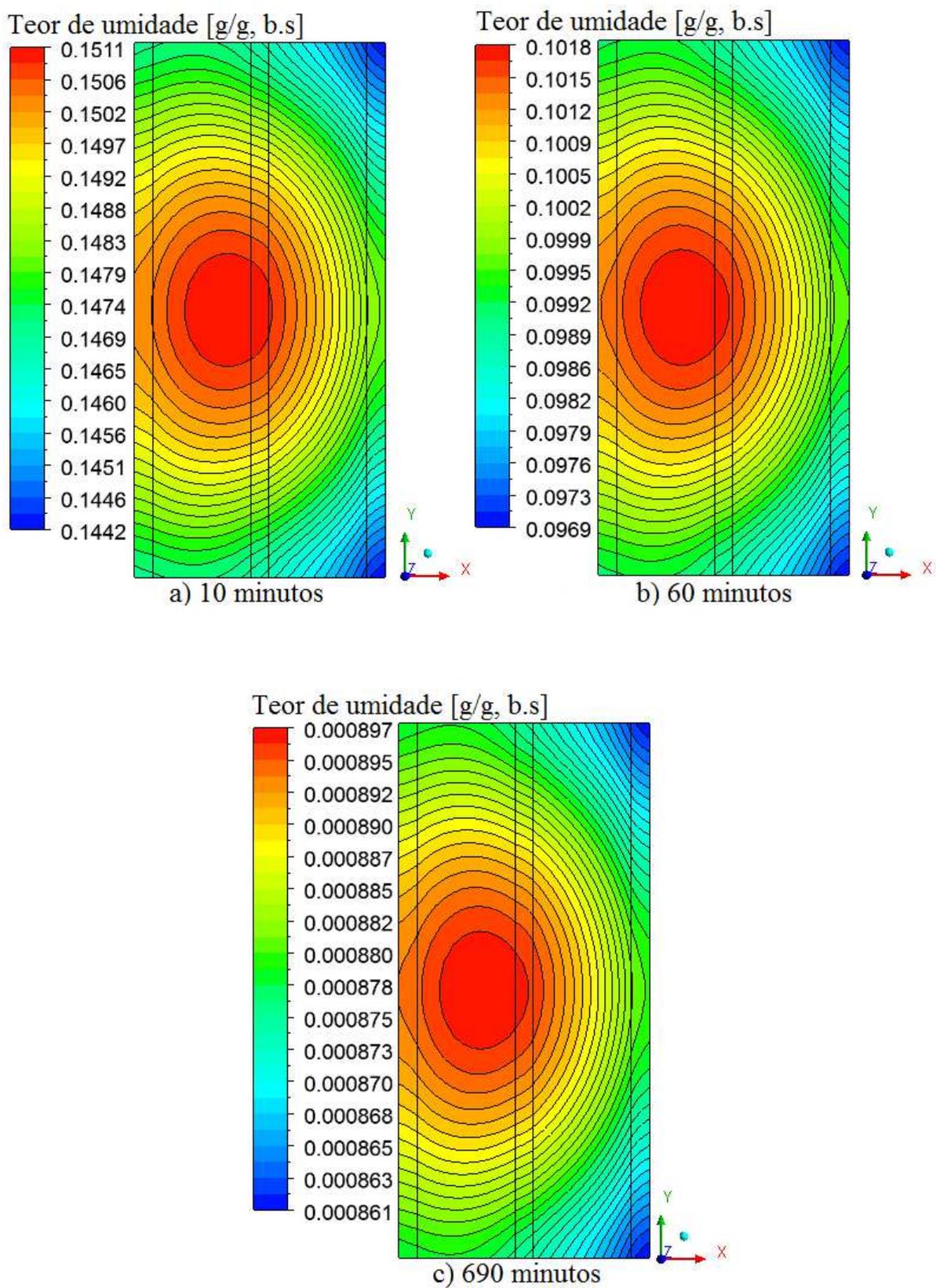


Figura 4.109: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 90°C.

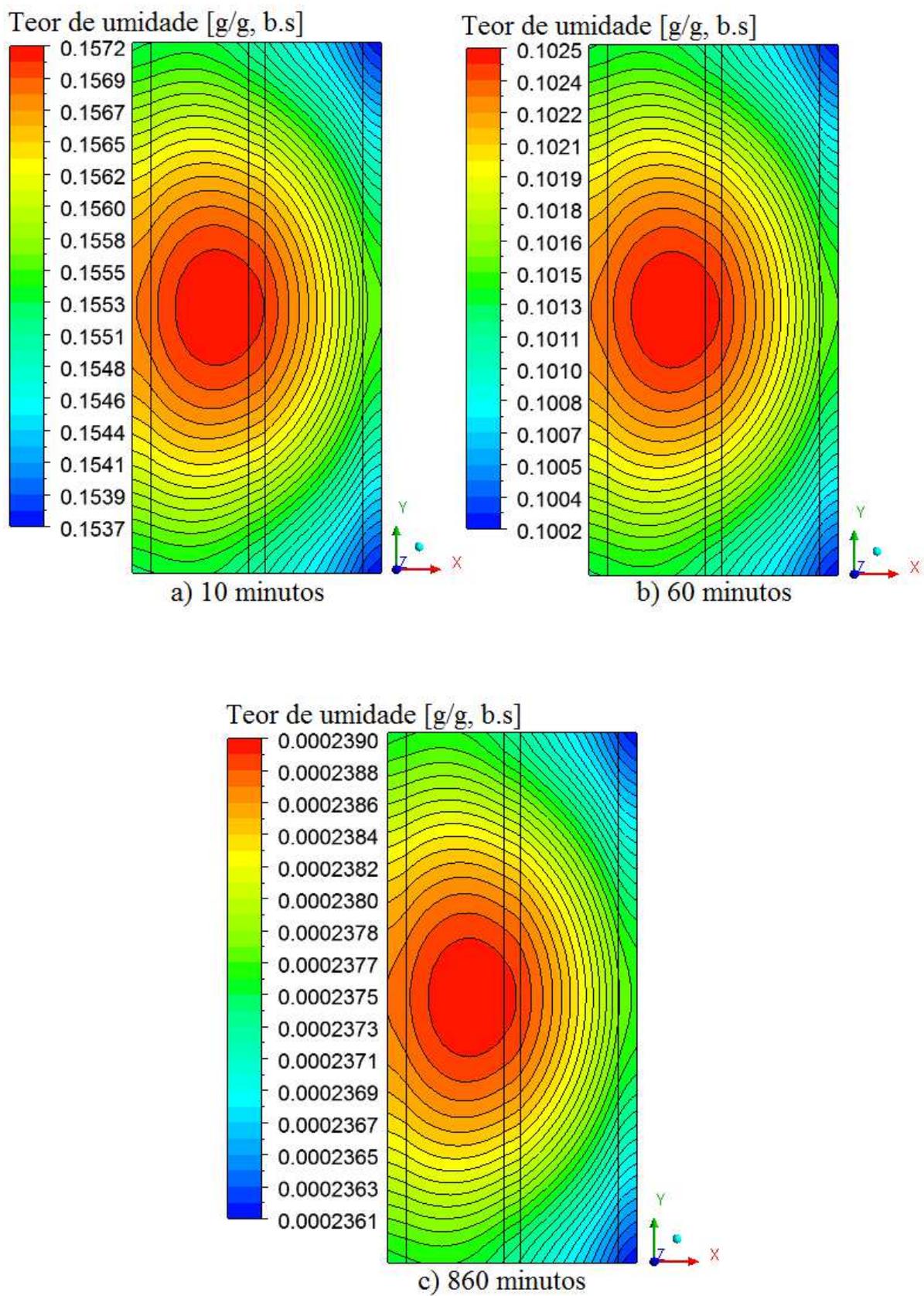


Figura 4.110: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano XY) para a secagem a 100°C.

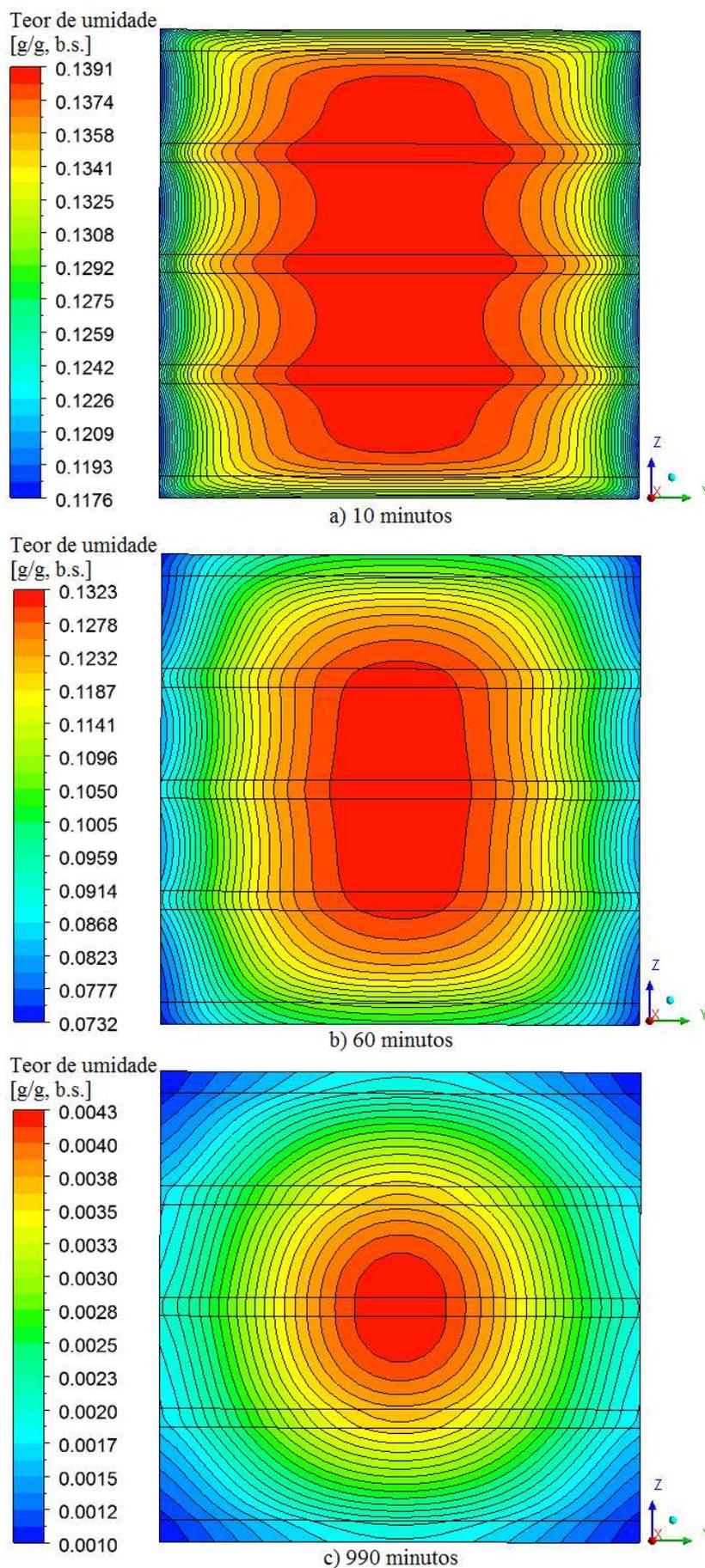


Figura 4.111: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 50°C.

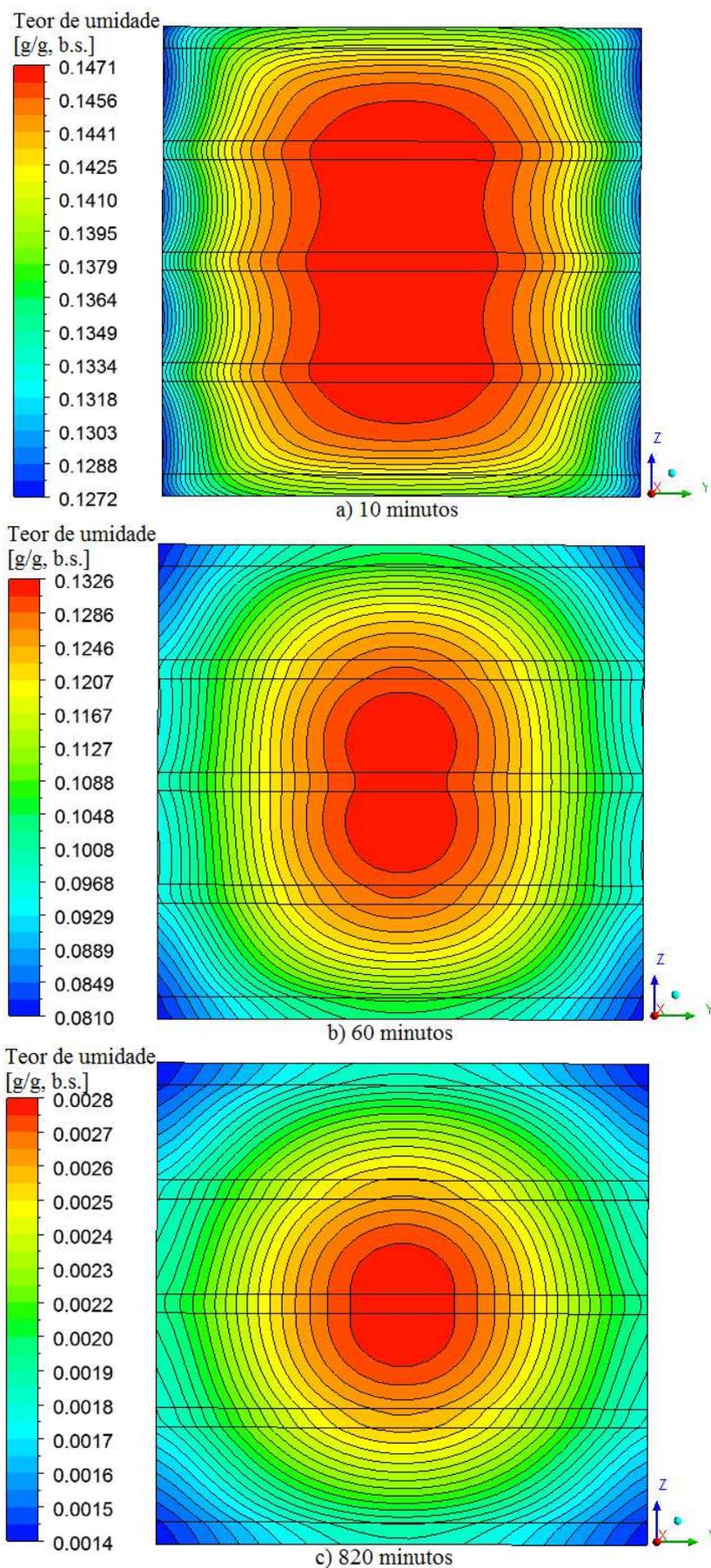


Figura 4.112: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 60°C.

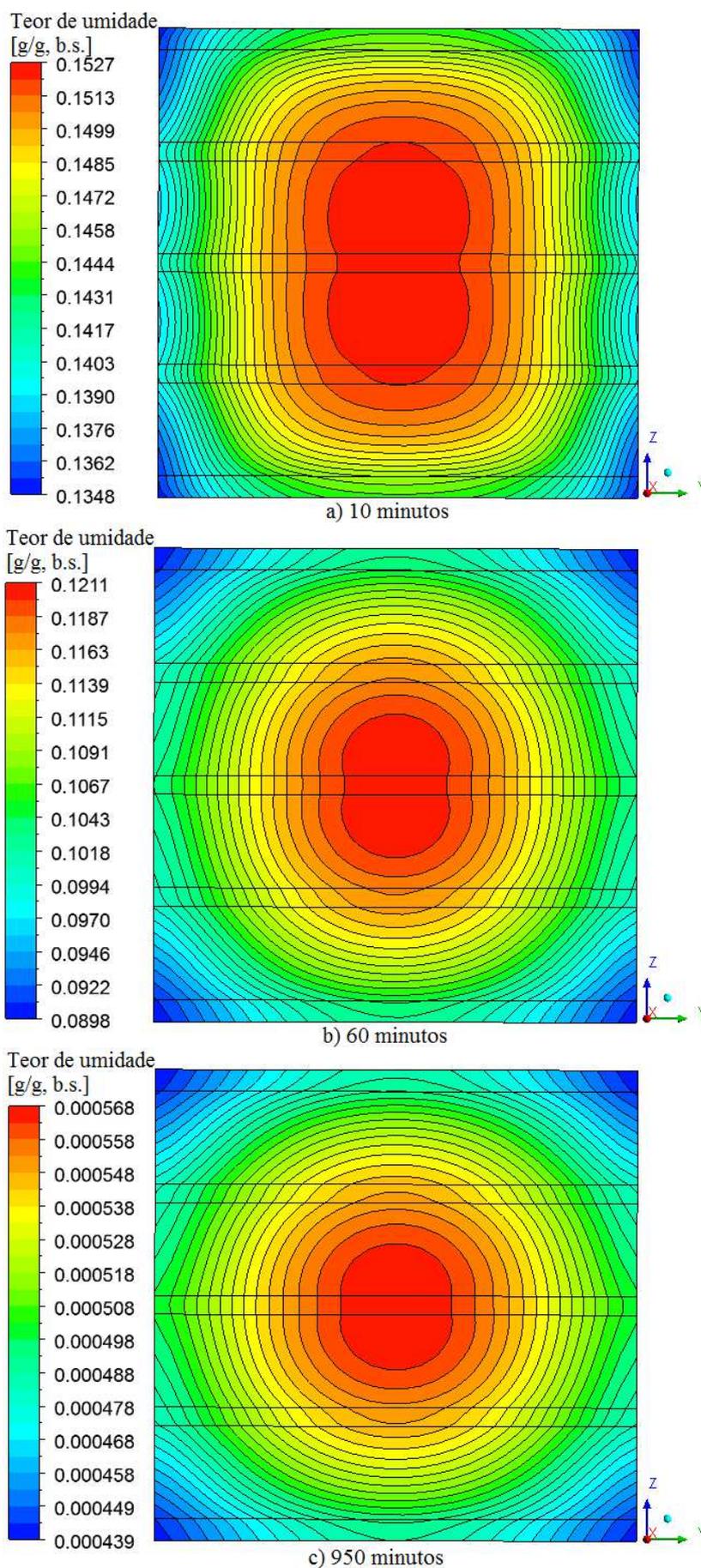


Figura 4.113: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 70°C.

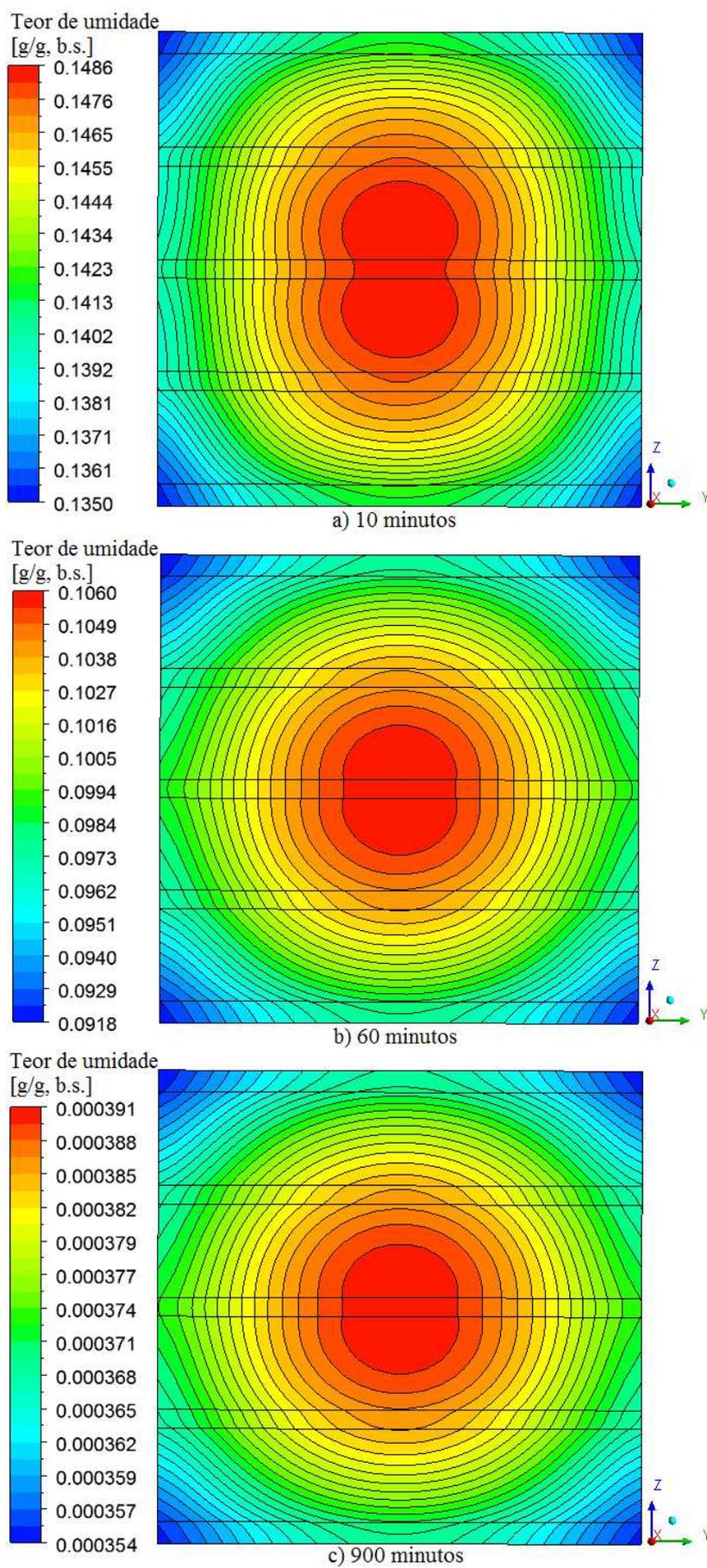


Figura 4.114: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 80°C.

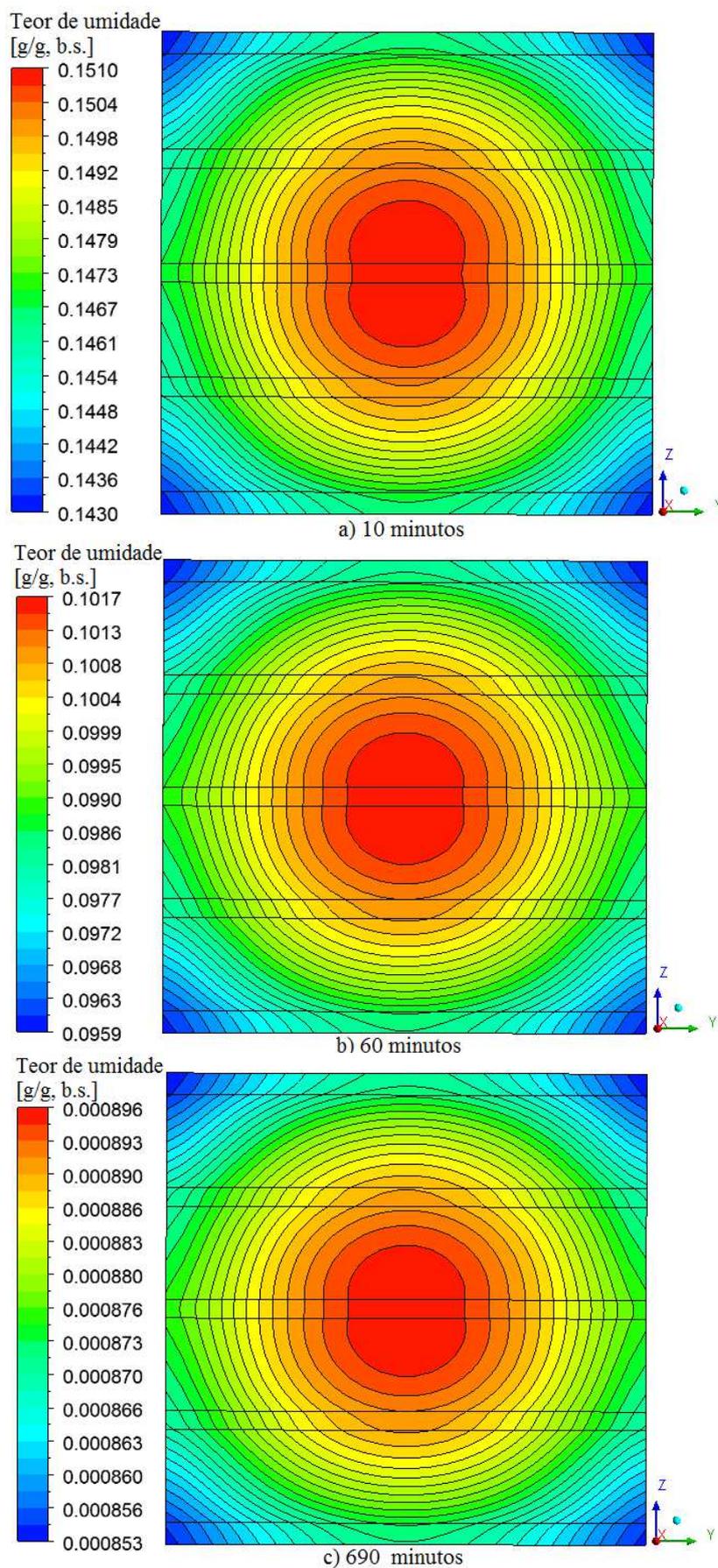


Figura 4.115: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 90°C.

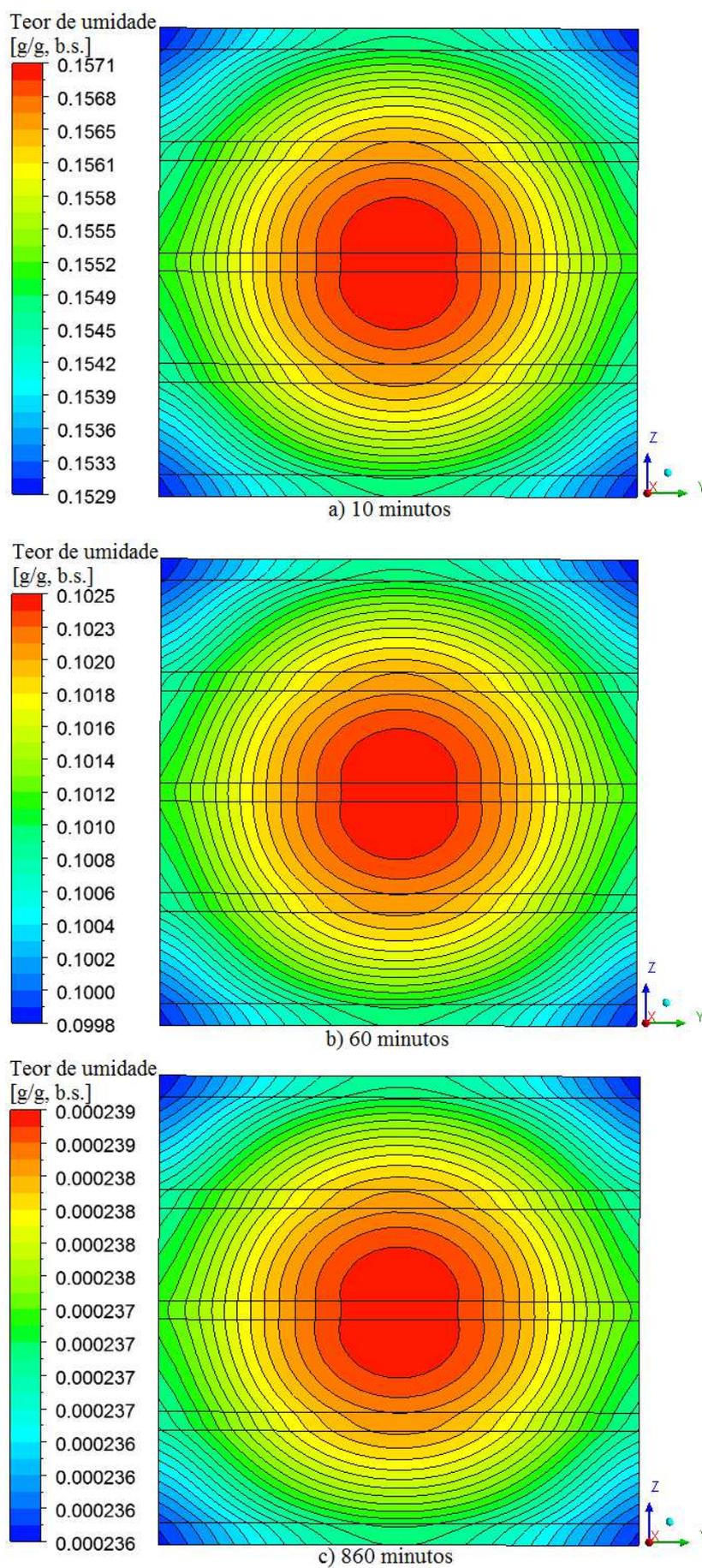


Figura 4.116: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo (Plano YZ) para a secagem a 100°C.

4.2.5 Distribuição dos parâmetros de transporte no ar

4.2.5.1 Campo de temperatura do ar

As Figuras 4.117 a 4.134 ilustram a distribuição de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) em diferentes tempos e condições de secagem. A partir da análise destas figuras, verifica-se que a transferência de calor por um processo espontâneo ocorre do ar com temperatura elevada para tijolo com temperatura mais baixa. No aquecimento dentro da estufa, o ar quente transfere calor para o tijolo cerâmico e, ao passar pelo material, sofre uma leve diminuição em sua temperatura, principalmente próximo a superfície do tijolo e dentro da camada limite térmica. Para interpretar melhor a figura, deve ser observado que o ar escoa da direita para a esquerda. Verifica-se ainda uma simetria entre a parte superior e inferior do Plano XZ.

A maior variação de temperatura ocorre nos tempos iniciais de secagem, onde o tijolo se encontra em baixas temperaturas, em qualquer temperatura do ar de secagem. Observa-se ainda, que os maiores gradientes de temperatura ocorrem, justamente nas proximidades da superfície do tijolo, correspondendo a camada limite térmica.

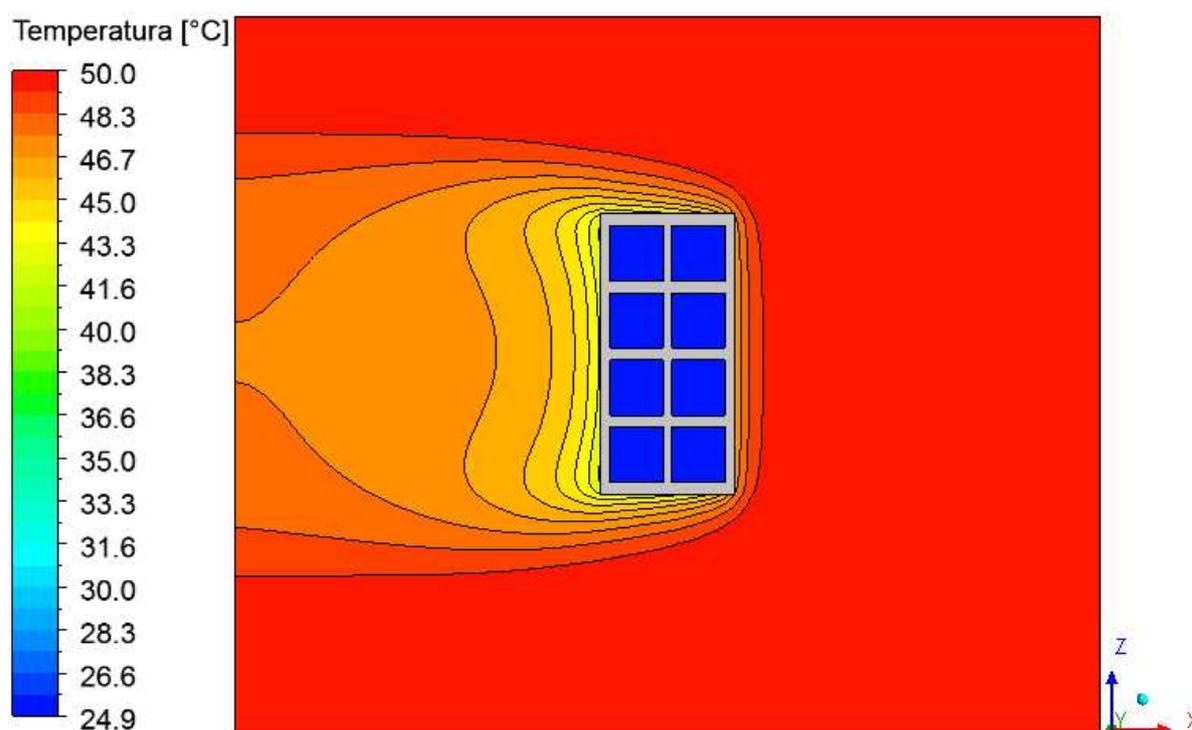


Figura 4.117: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 10 min).

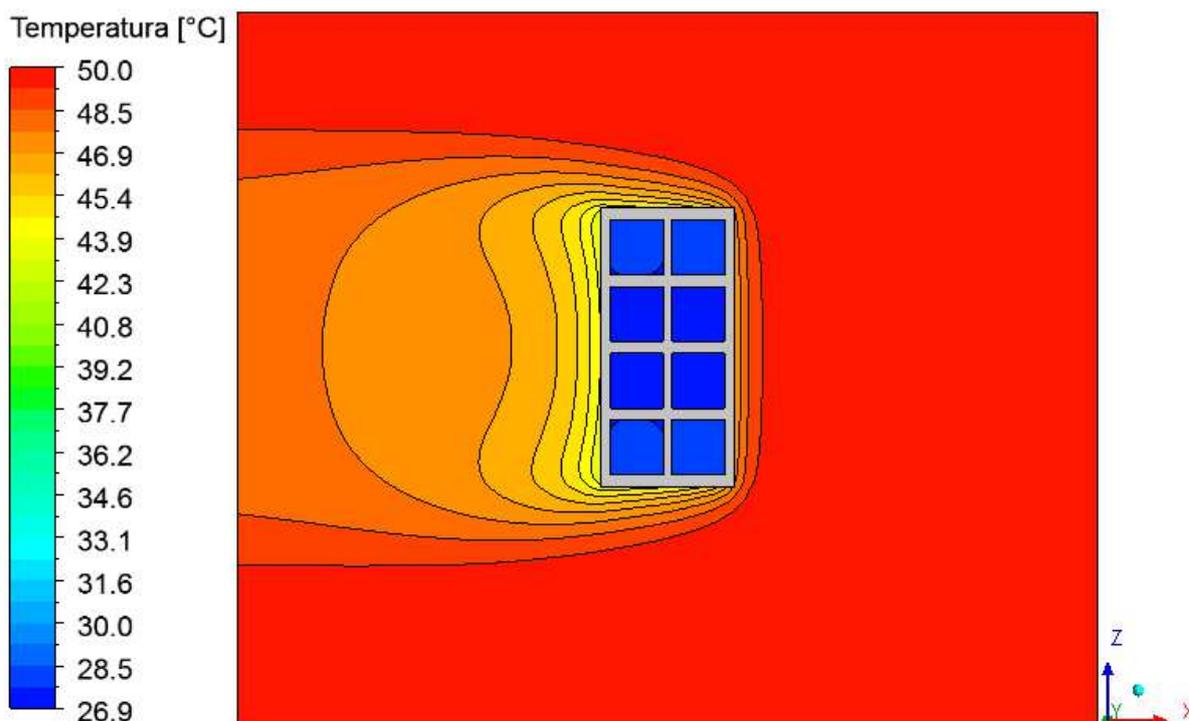


Figura 4.118: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 60 min).

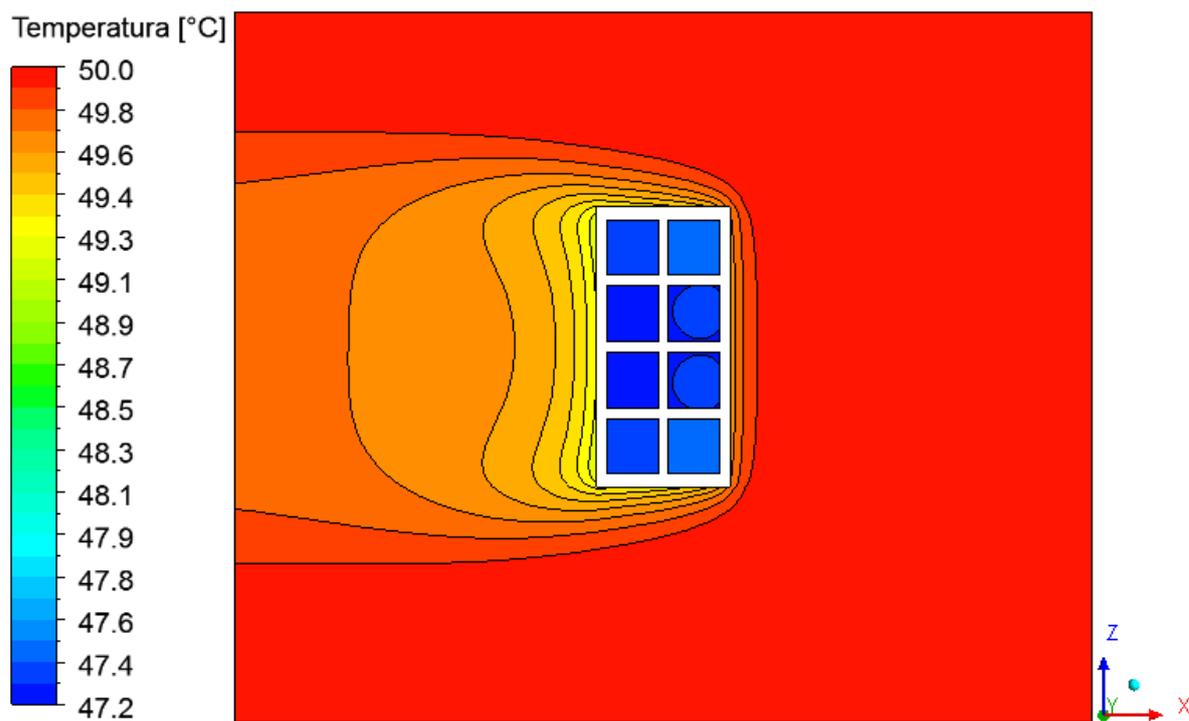


Figura 4.119: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 990 min).

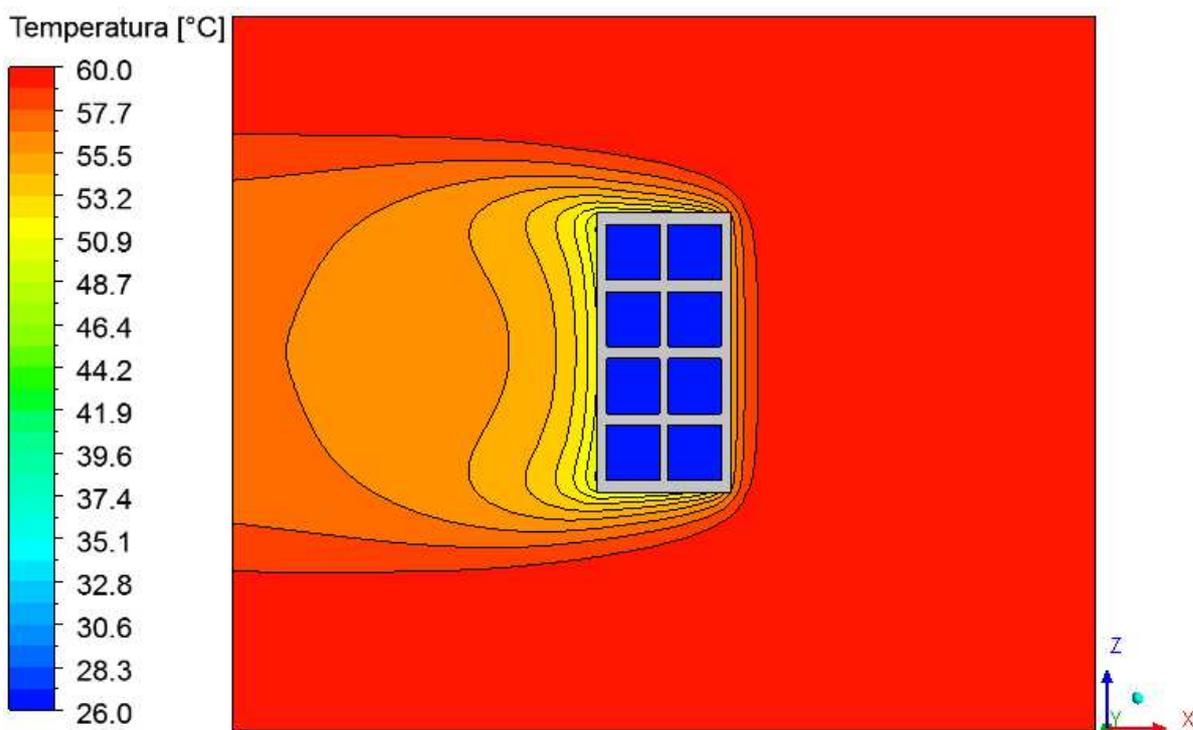


Figura 4.120: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 10 min).

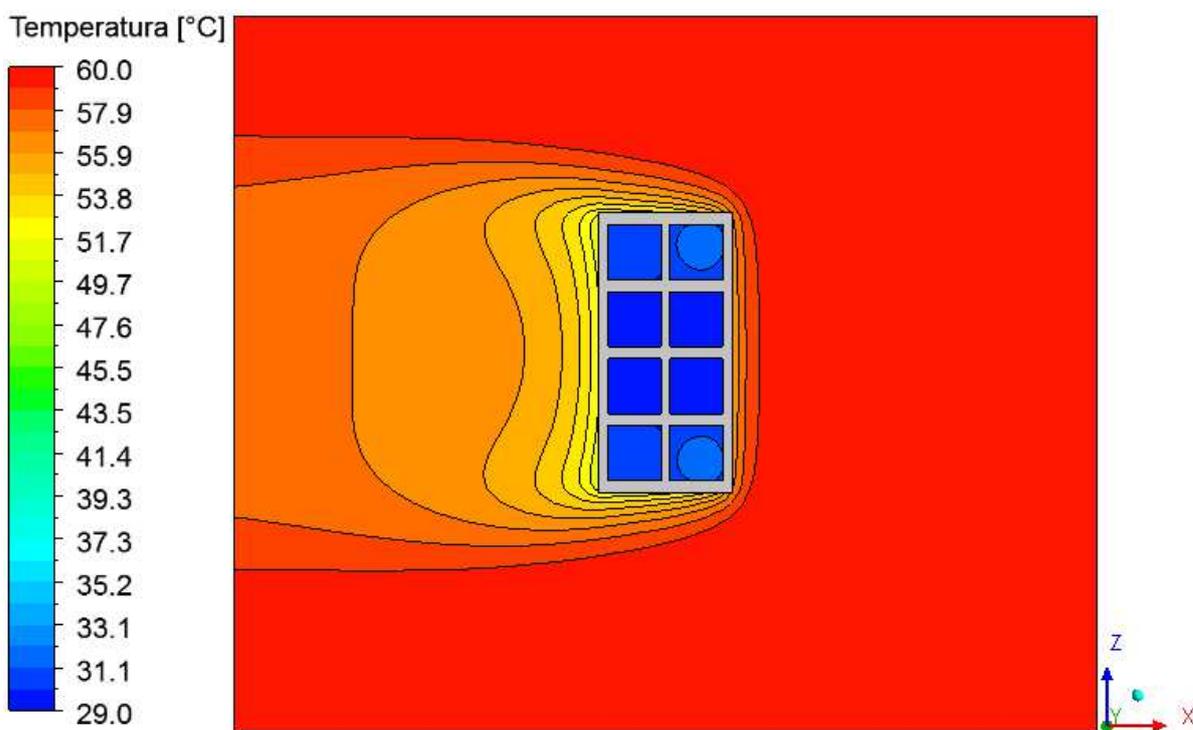


Figura 4.121: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 60 min).

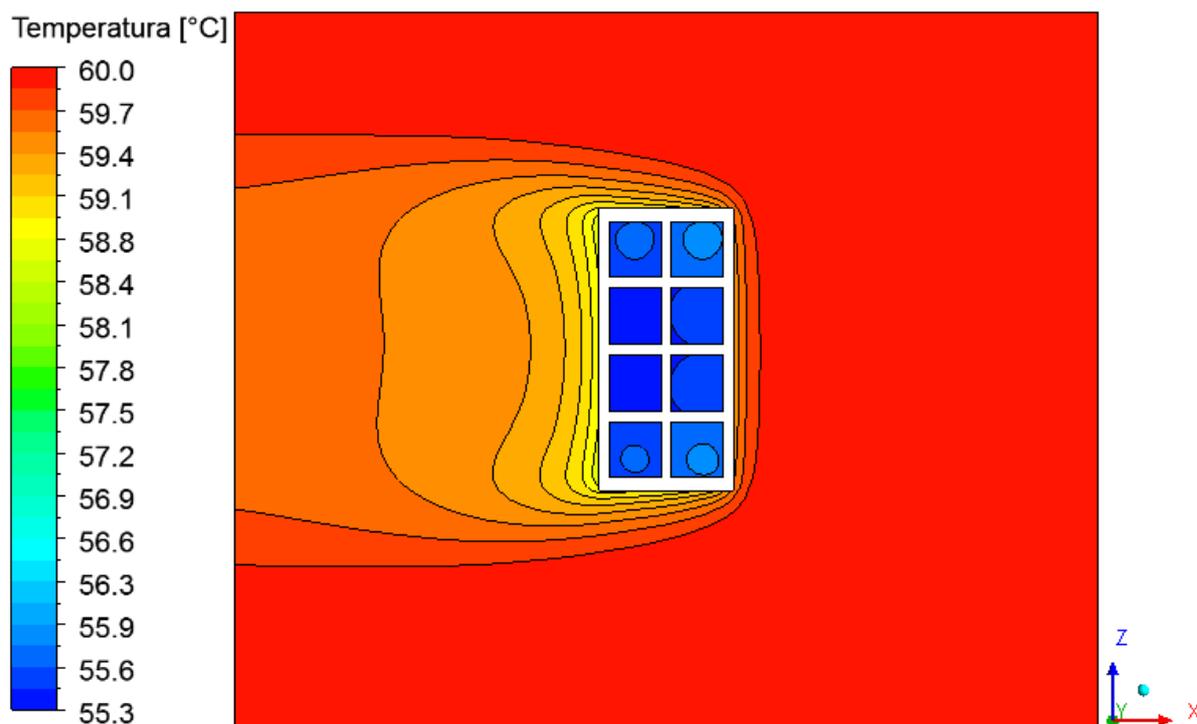


Figura 4.122: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 820 min).

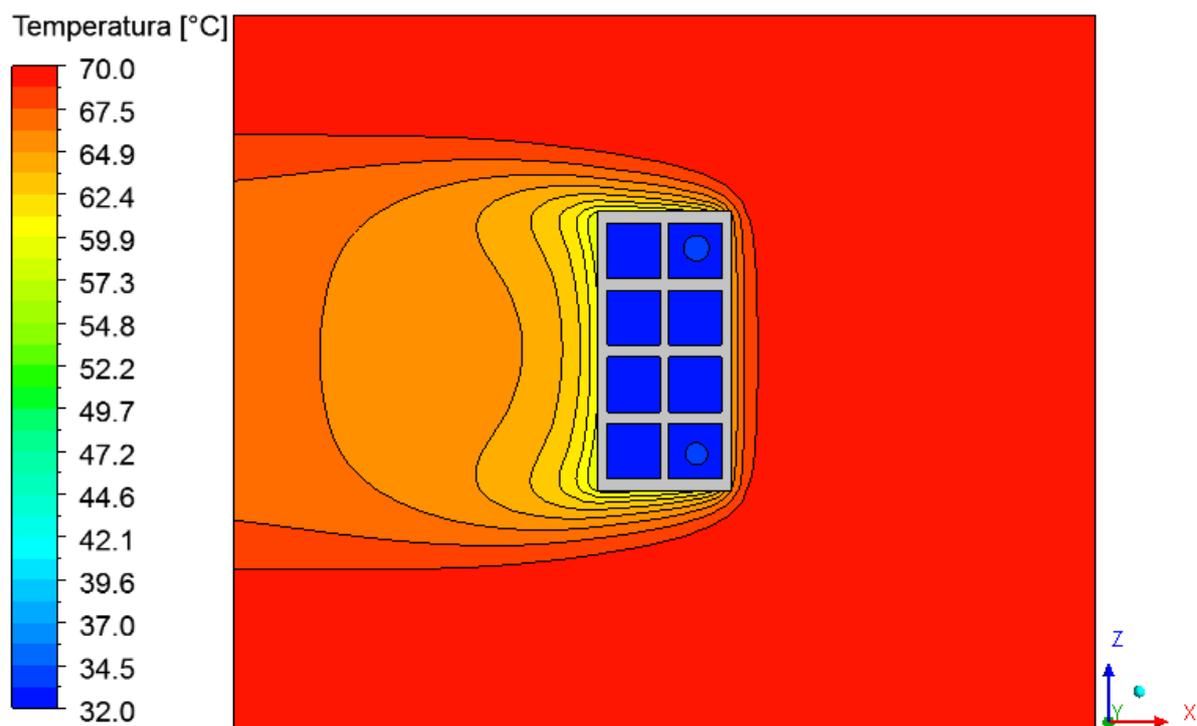


Figura 4.123: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 10 min).

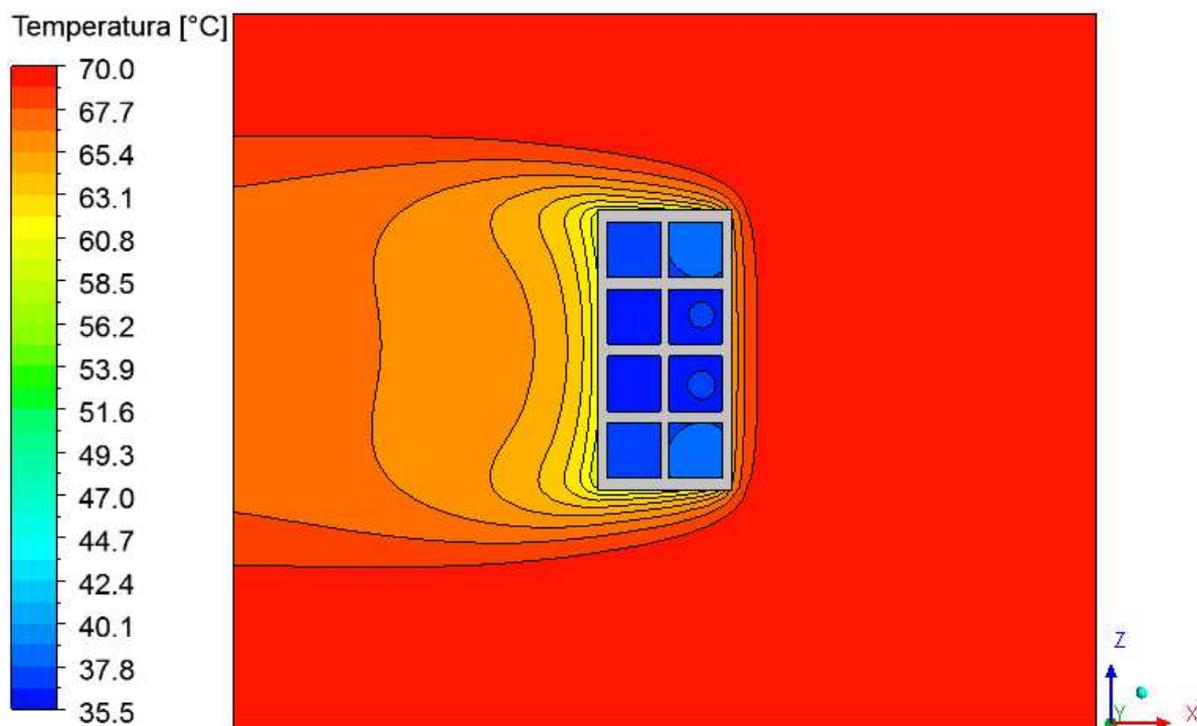


Figura 4.124: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 60 min).

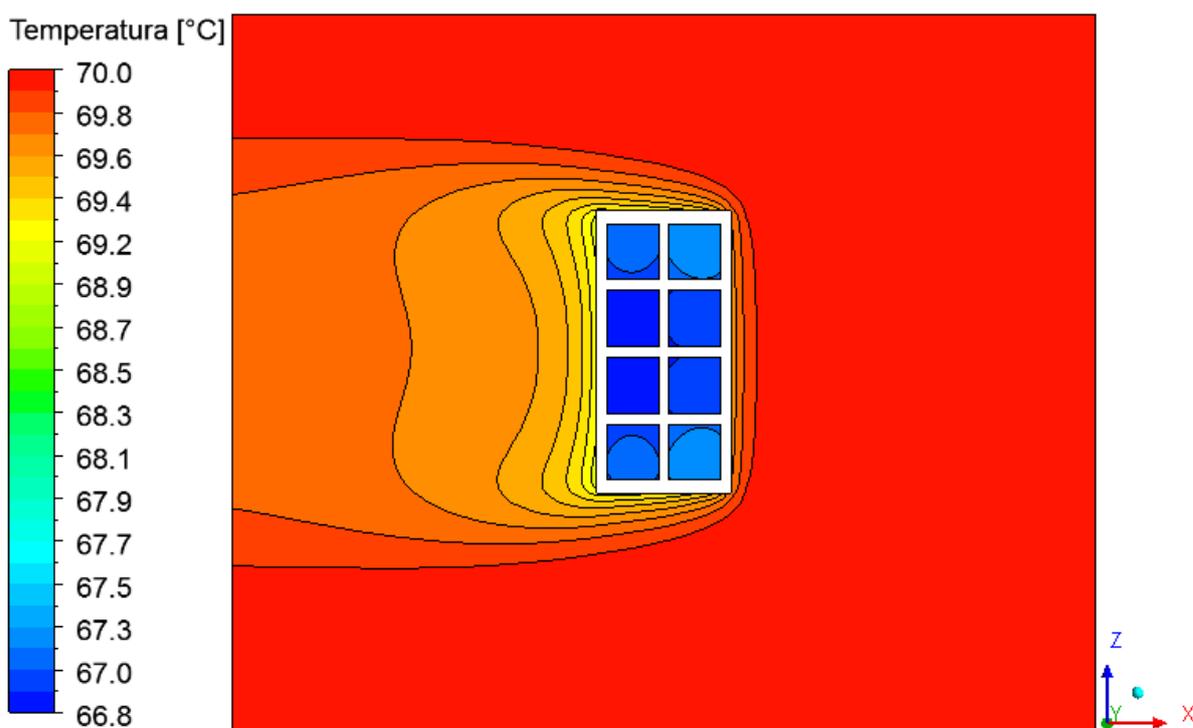


Figura 4.125: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C (t = 950 min).

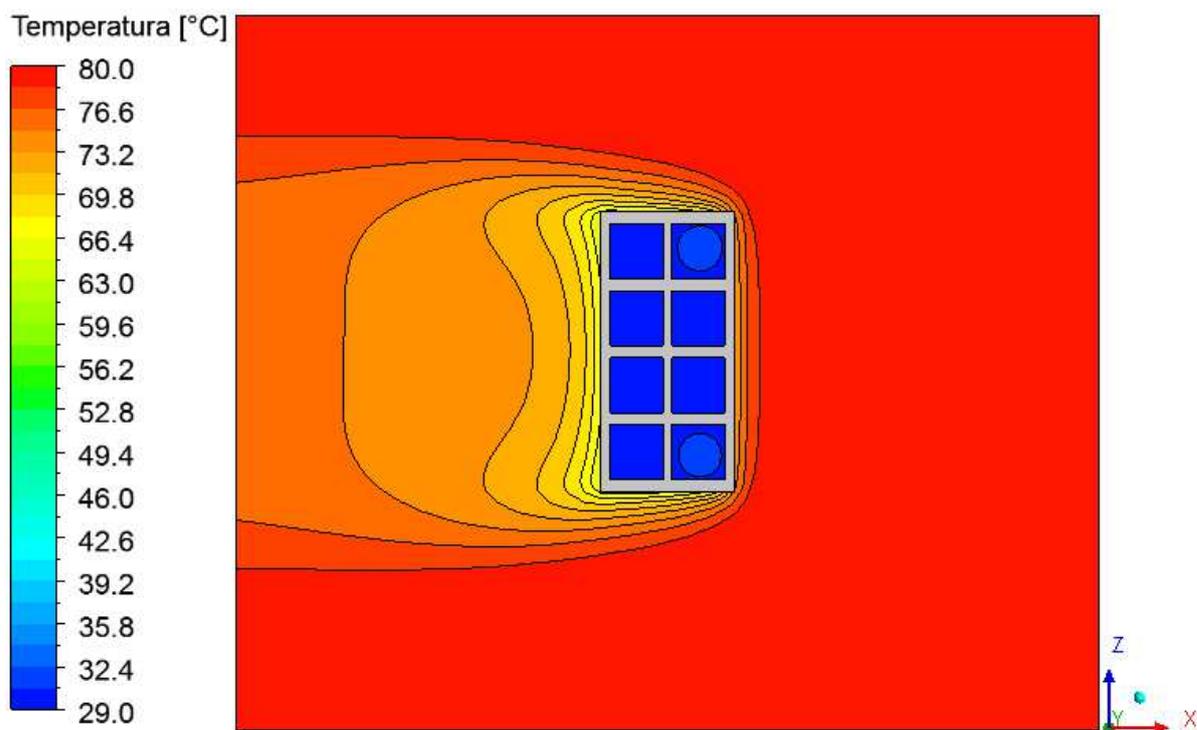


Figura 4.126: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 10 min).

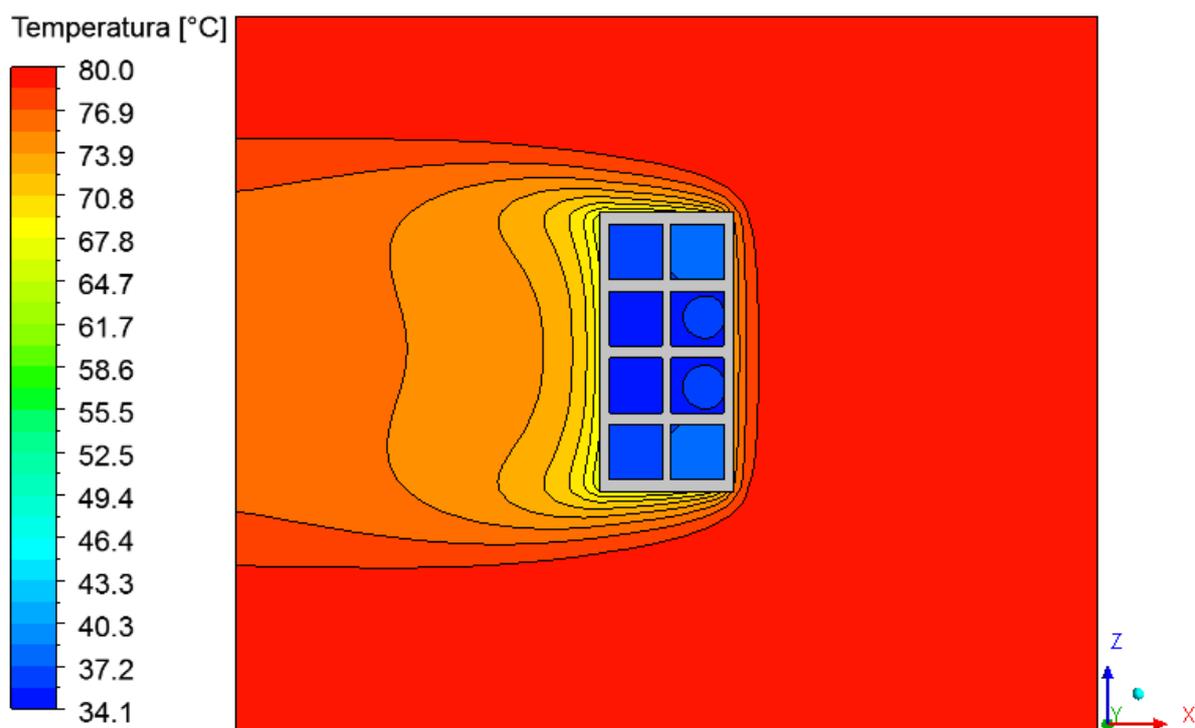


Figura 4.127: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 60 min).

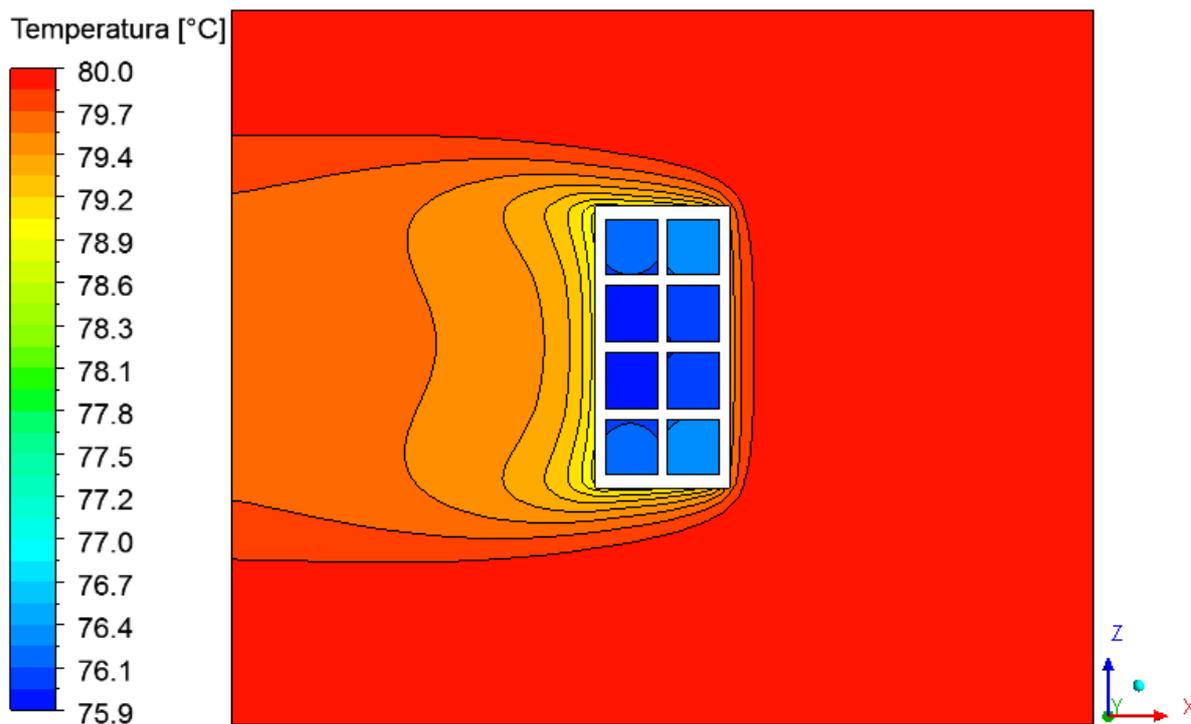


Figura 4.128: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 900 min).

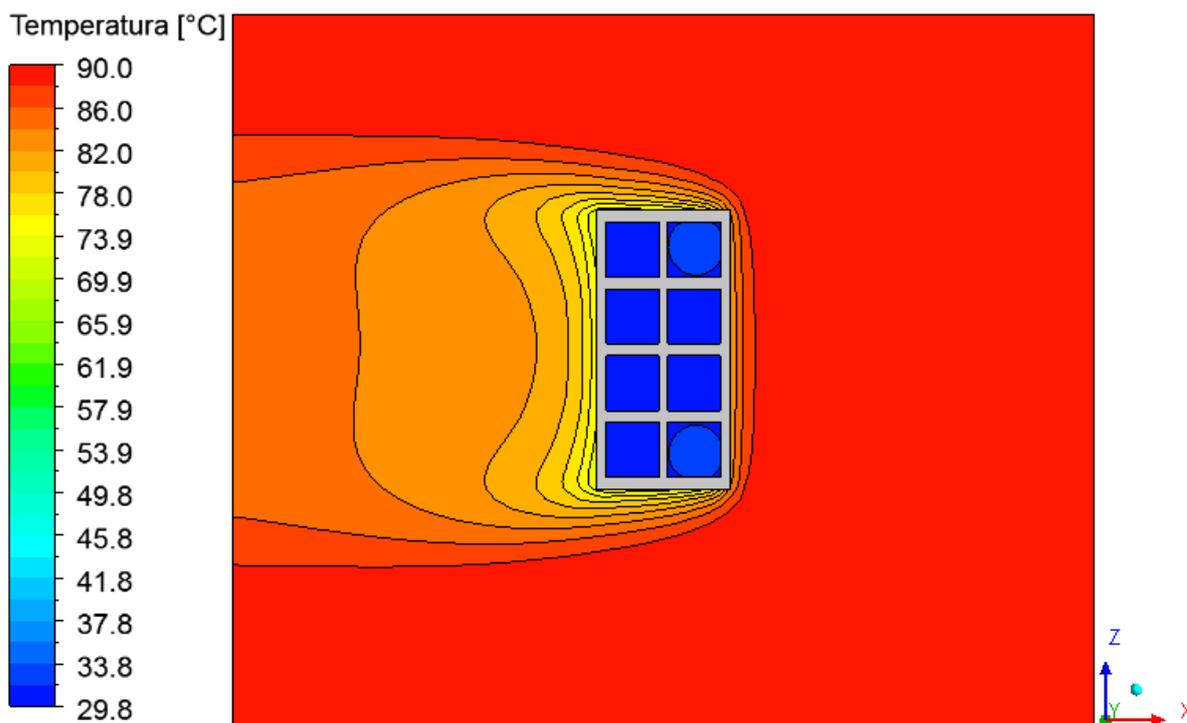


Figura 4.129: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 10 min).

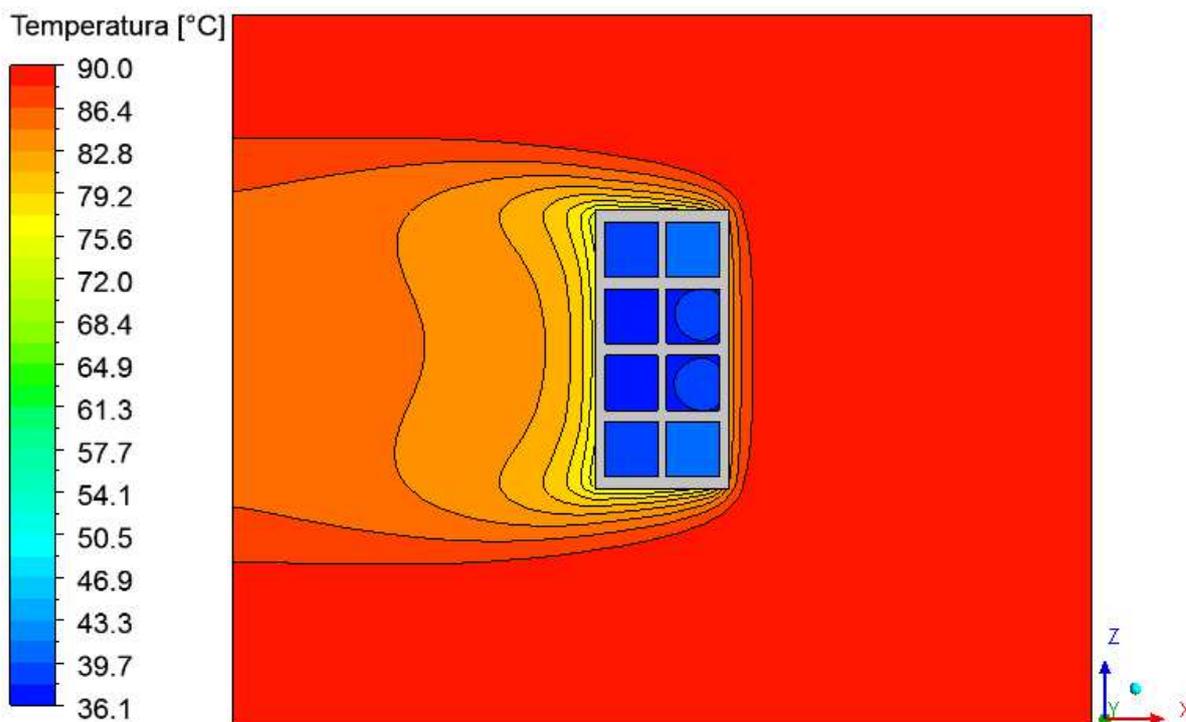


Figura 4.130: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 60 min).

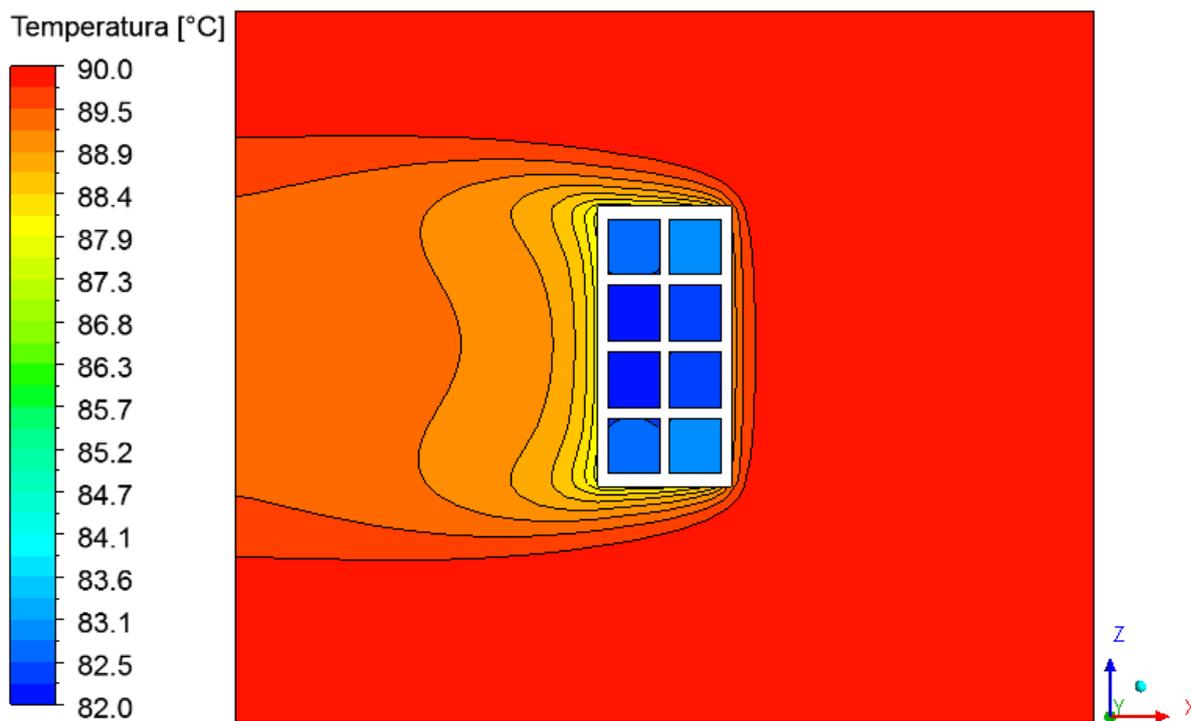


Figura 4.131: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 690 min).

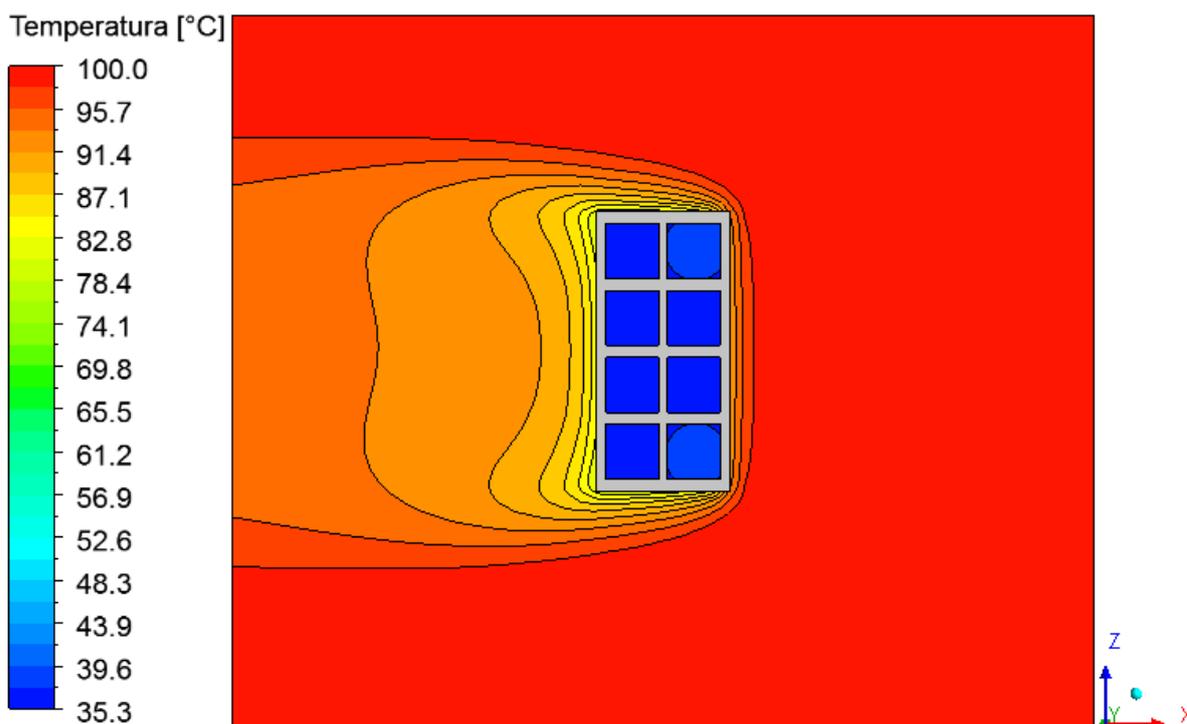


Figura 4.132: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 10 min).

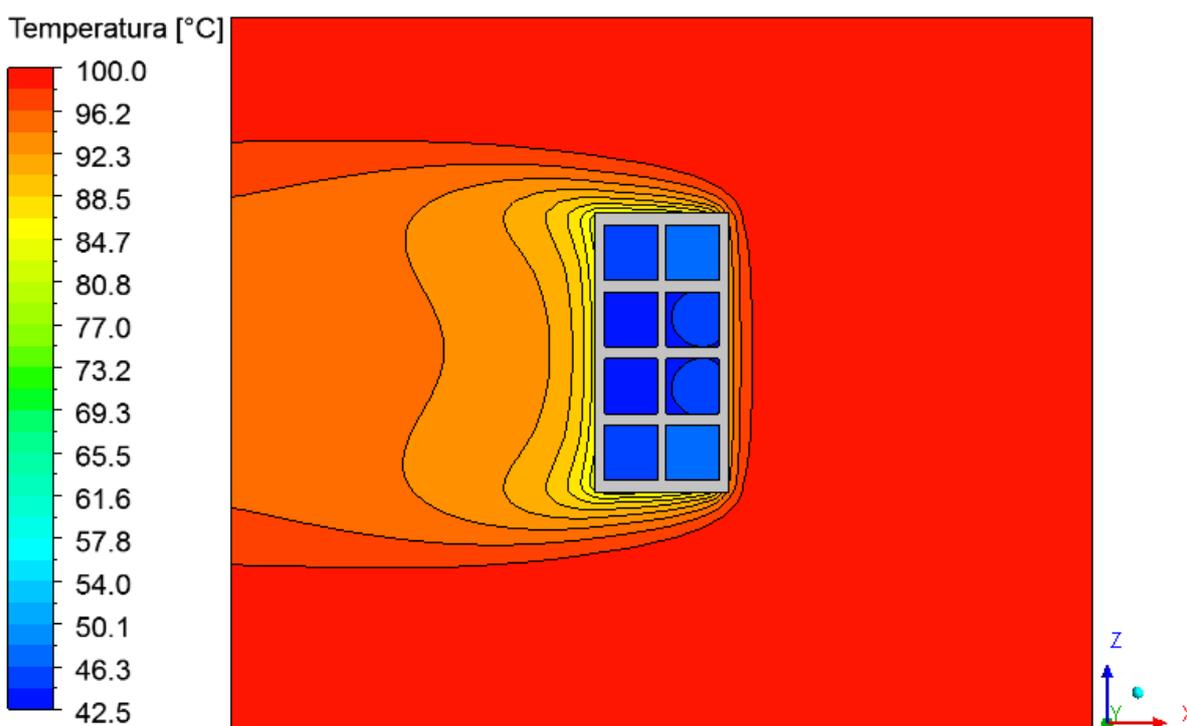


Figura 4.133: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 60 min).

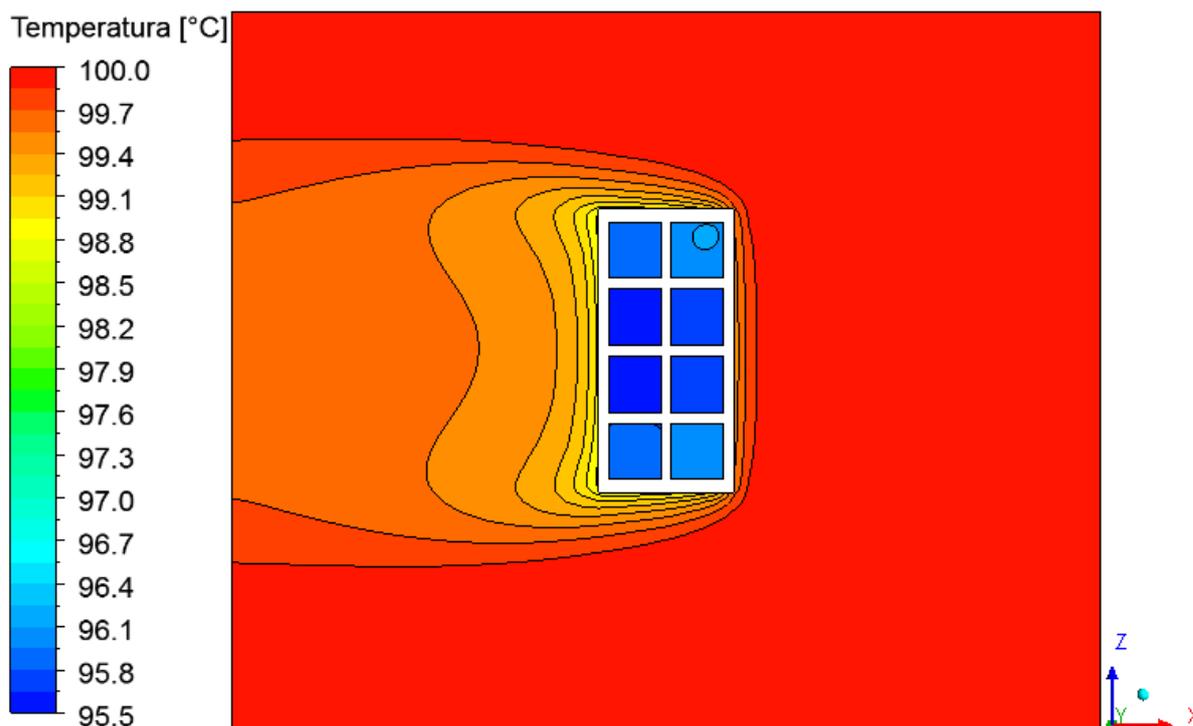


Figura 4.134: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C ($t = 860$ min).

4.2.5.2 Campo de massa de água

Nas Figuras 4.135 a 4.158 estão representados os campos de massa de água no ar da estufa, em diferentes tempos e condições de secagem.

Note que no instante inicial da secagem ($t = 0$ min), o campo é homogêneo, contendo apenas a massa equivalente à umidade absoluta do ar de secagem. Ao longo do processo percebe-se que o ar, ao passar pelo tijolo, transporta a massa de água perdida pelo material. Isto é claramente observável pela tonalidade no campo de massa. Na secagem a 50°C ($t = 10$ min), por exemplo, na região mais central do lado esquerdo, referente à saída de ar da estufa, o ar sai com massa de água em torno de 49 g, enquanto que, em direção à borda, o valor da massa de água praticamente se iguala ao valor na entrada da estufa. No instante final do processo, quando o tijolo já perdeu quase toda a sua massa de água contida em seu interior, o ar ao passar pelo tijolo ainda carrega a massa de água, só que em uma quantidade bem inferior, conforme esperado.

Devido à posição do tijolo no interior da estufa, o ar acumula-se na região vazada do tijolo. Isto justifica o fato dessas regiões serem mais difíceis de desumidificar, e também de se aquecer. Observa-se ainda, próximo à superfície do tijolo, uma região com alto gradiente

de massa de água, na fase vapor. E a camada limite de concentração verifica-se, também, que há uma simetria entre a parte superior e inferior do plano XZ.

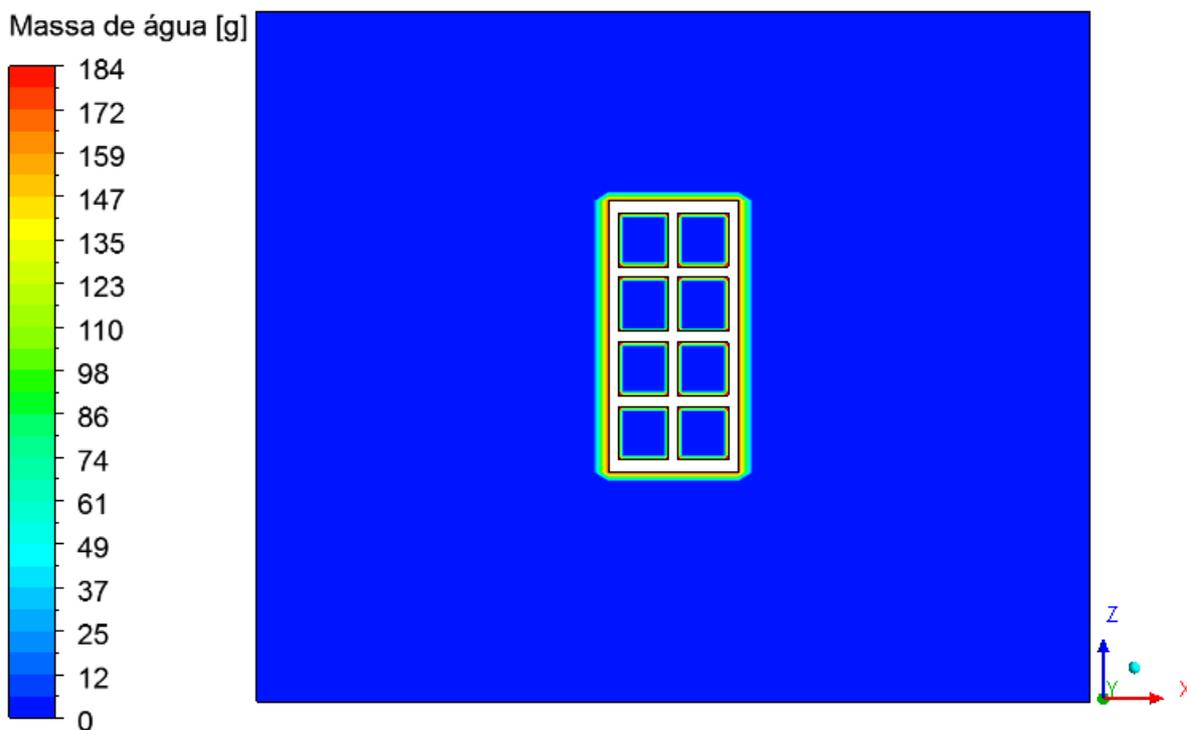


Figura 4.135: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C ($t = 0$ min).

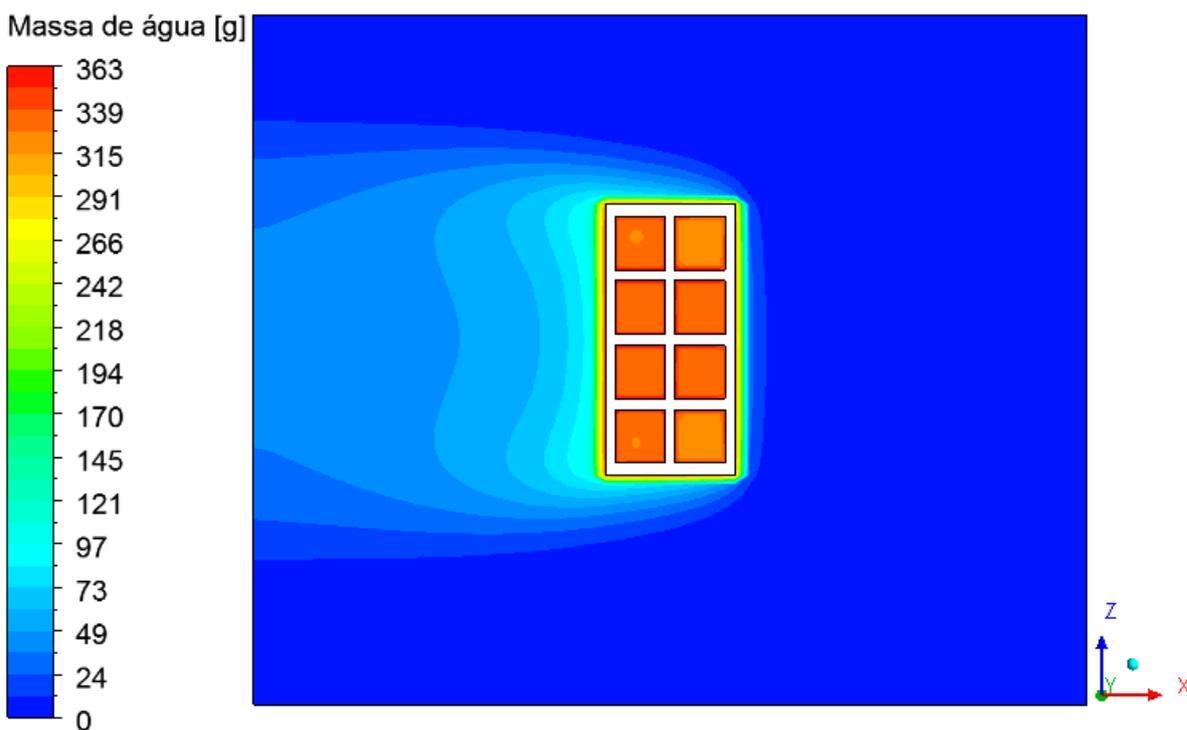


Figura 4.136: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C ($t = 10$ min).

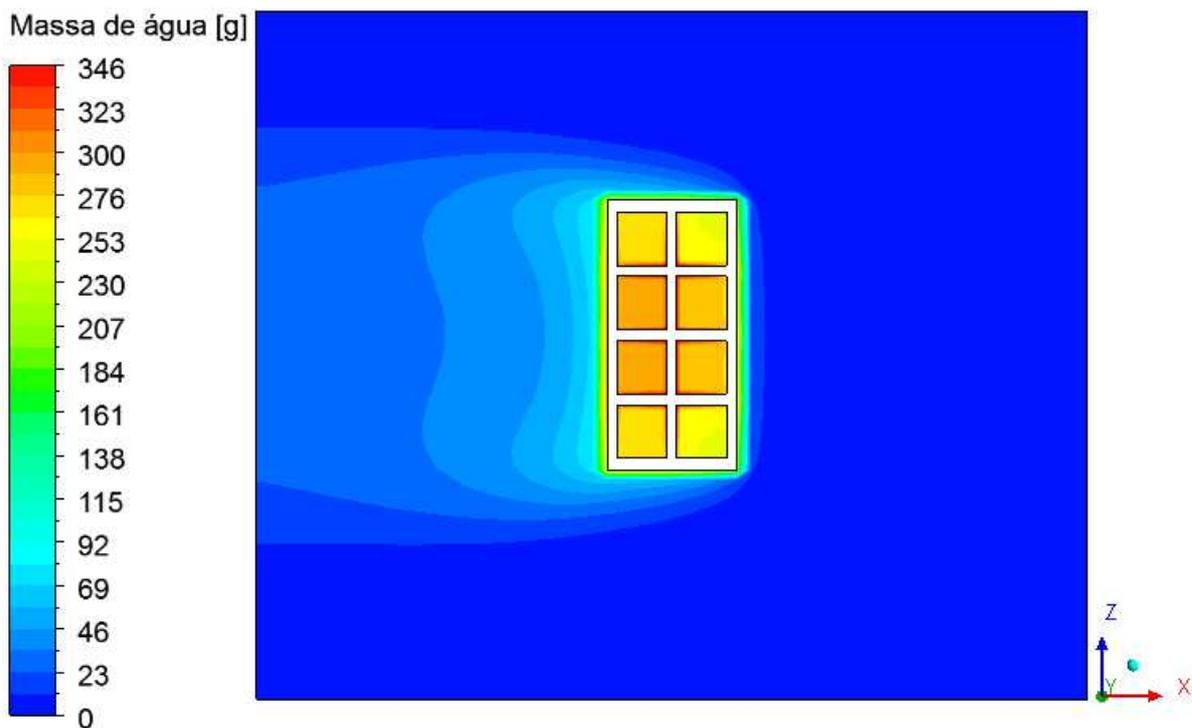


Figura 4.137: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C ($t = 60$ min).

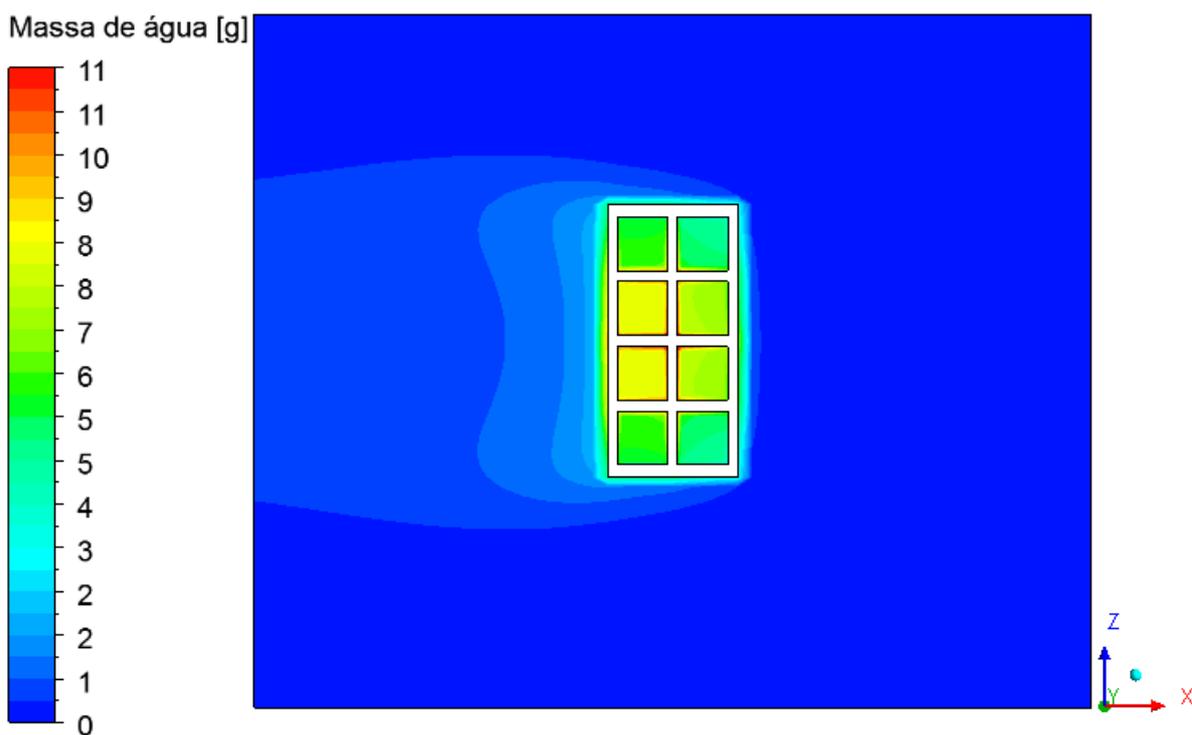


Figura 4.138: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C ($t = 990$ min).

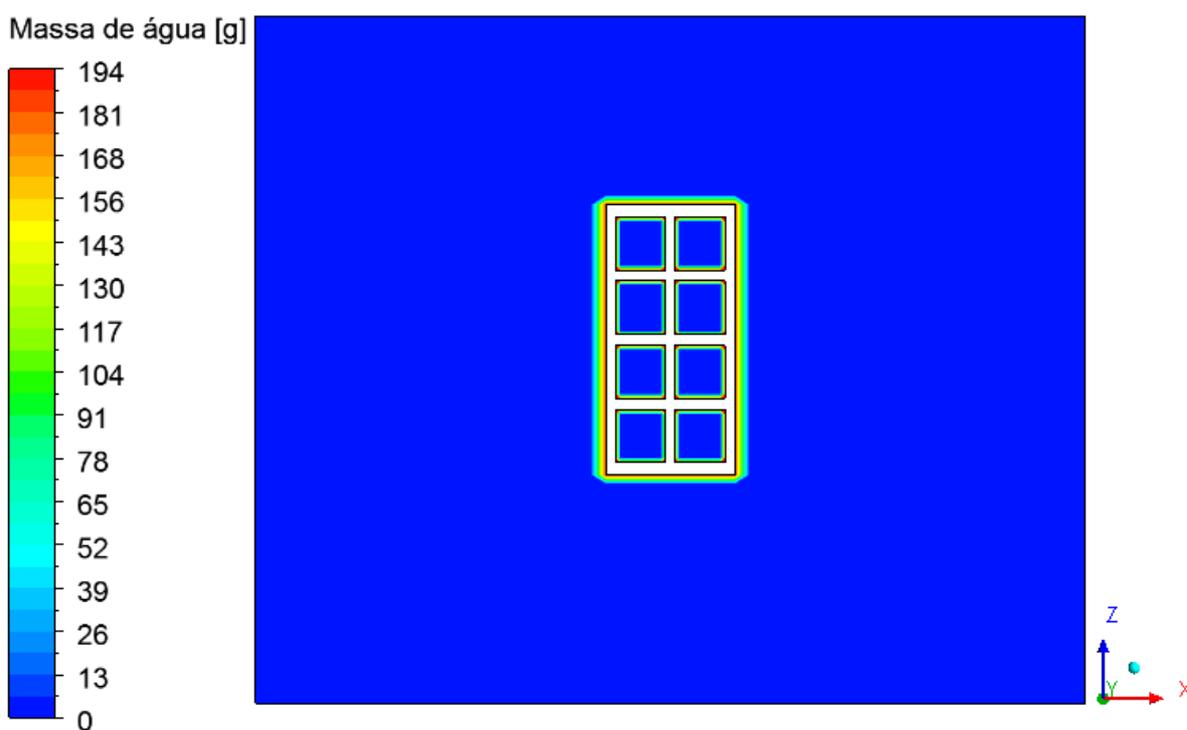


Figura 4.139: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 0 min).

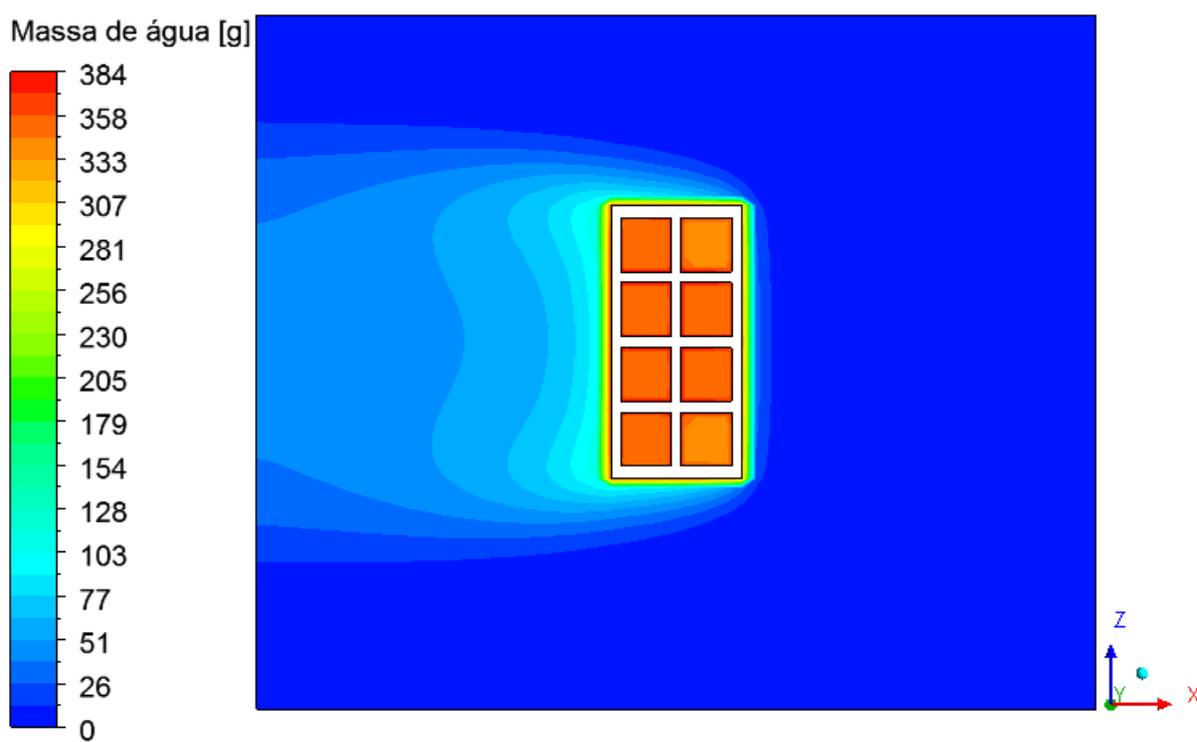


Figura 4.140: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C (t = 10 min).

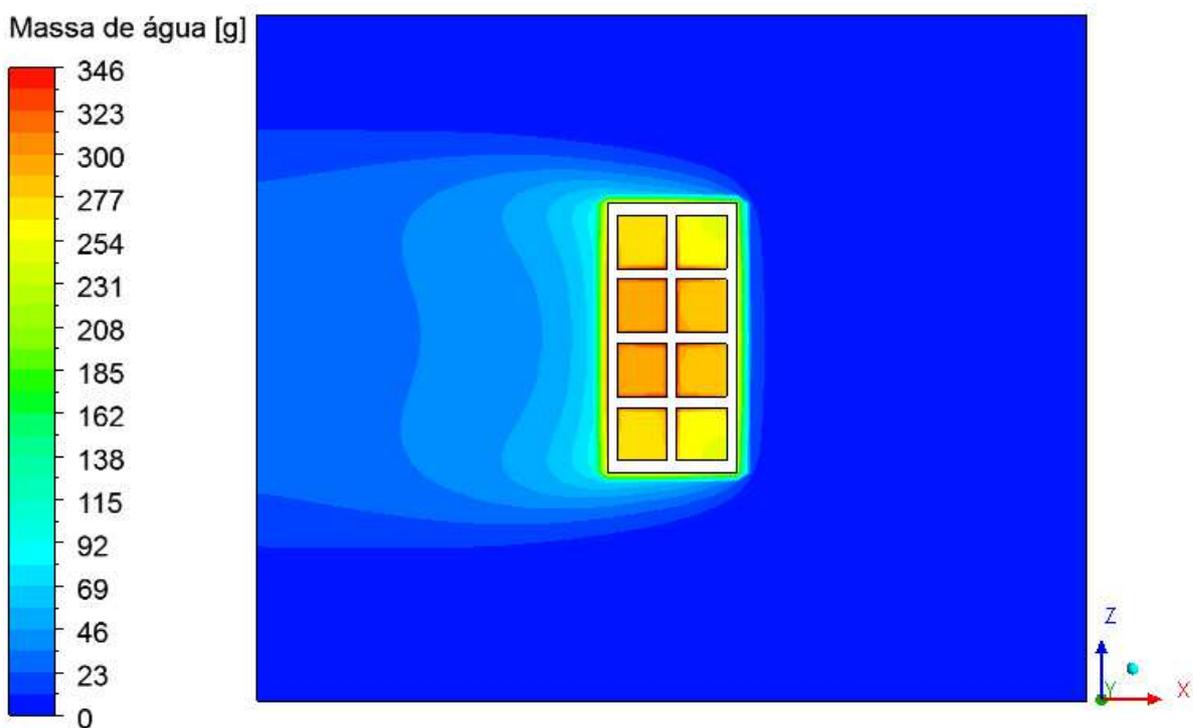


Figura 4.141: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C ($t = 60$ min).

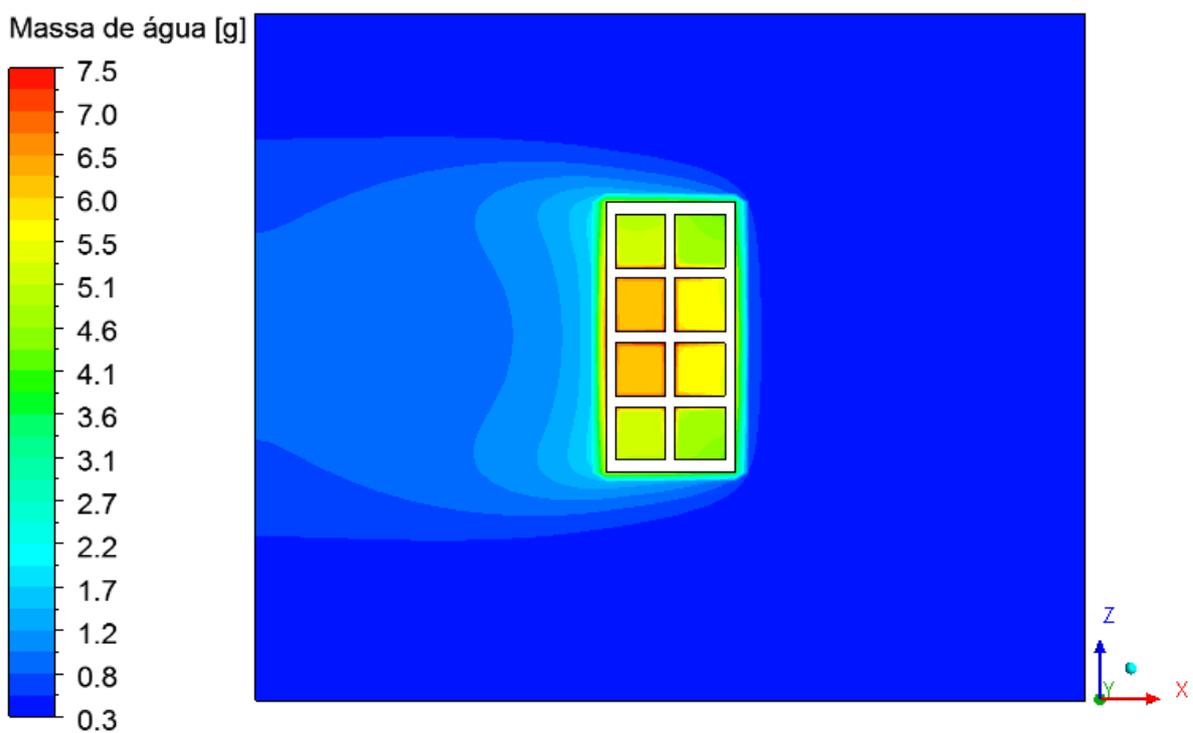


Figura 4.142: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C ($t = 820$ min).

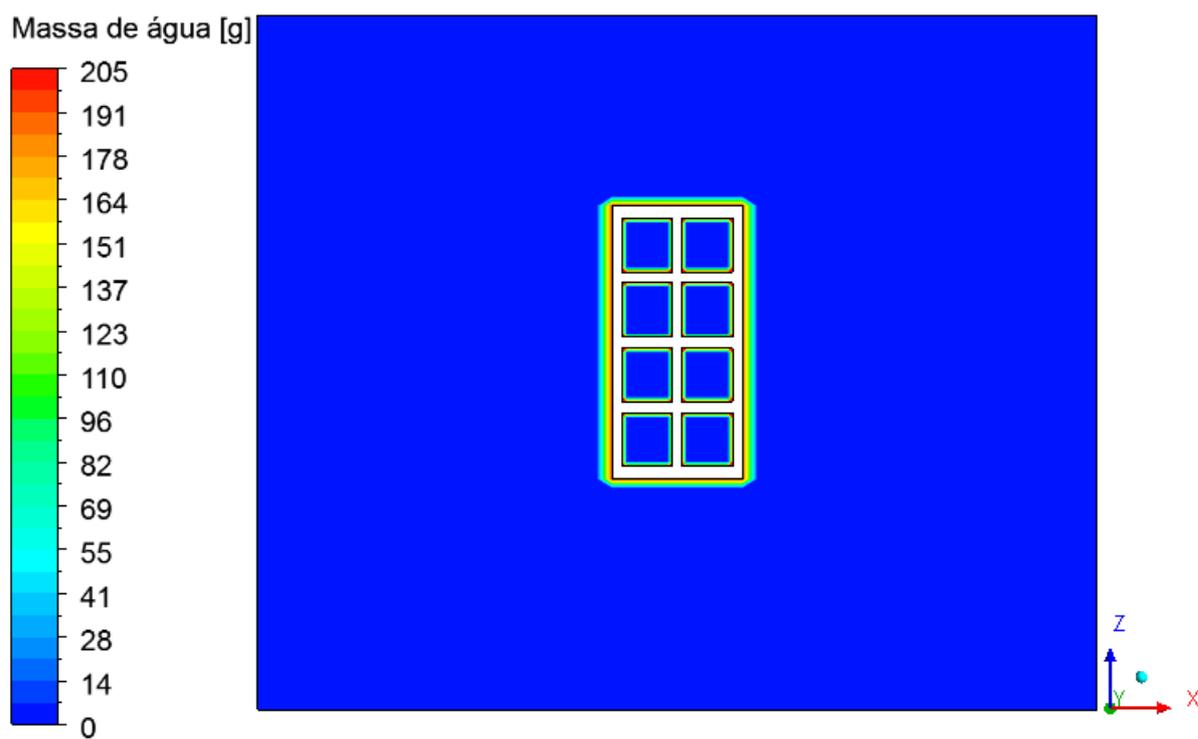


Figura 4.143: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C ($t = 0$ min).

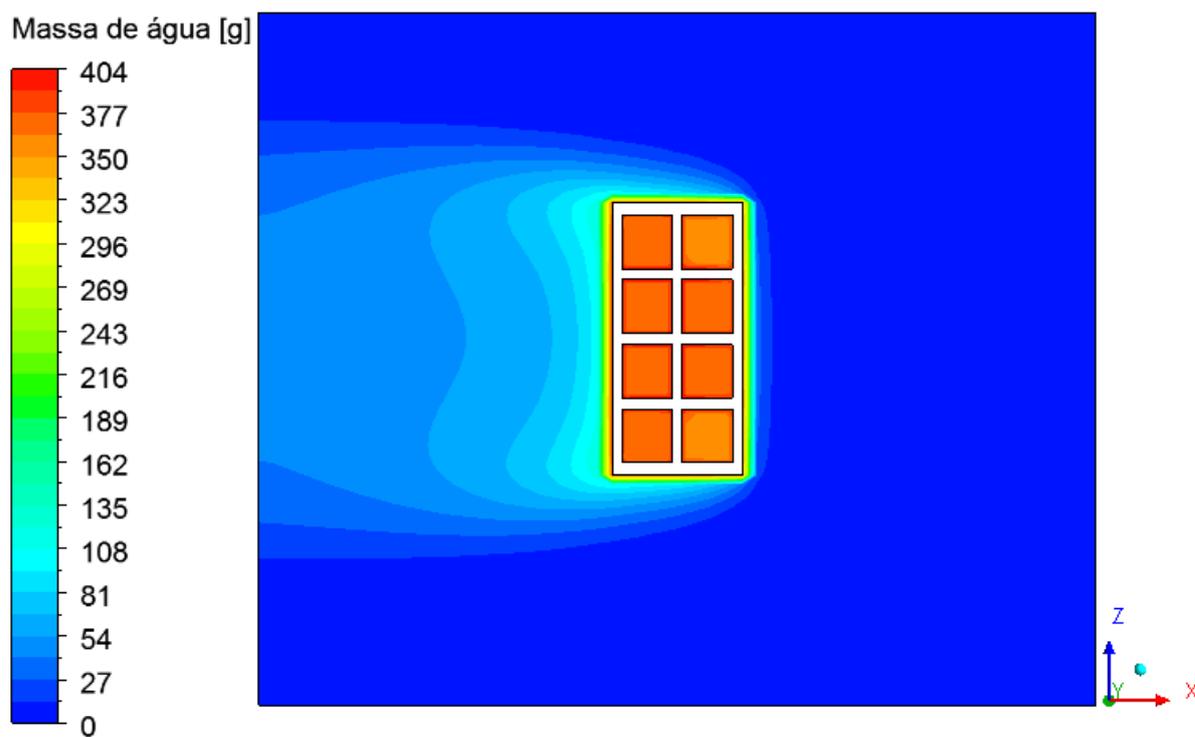


Figura 4.144: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C ($t = 10$ min).

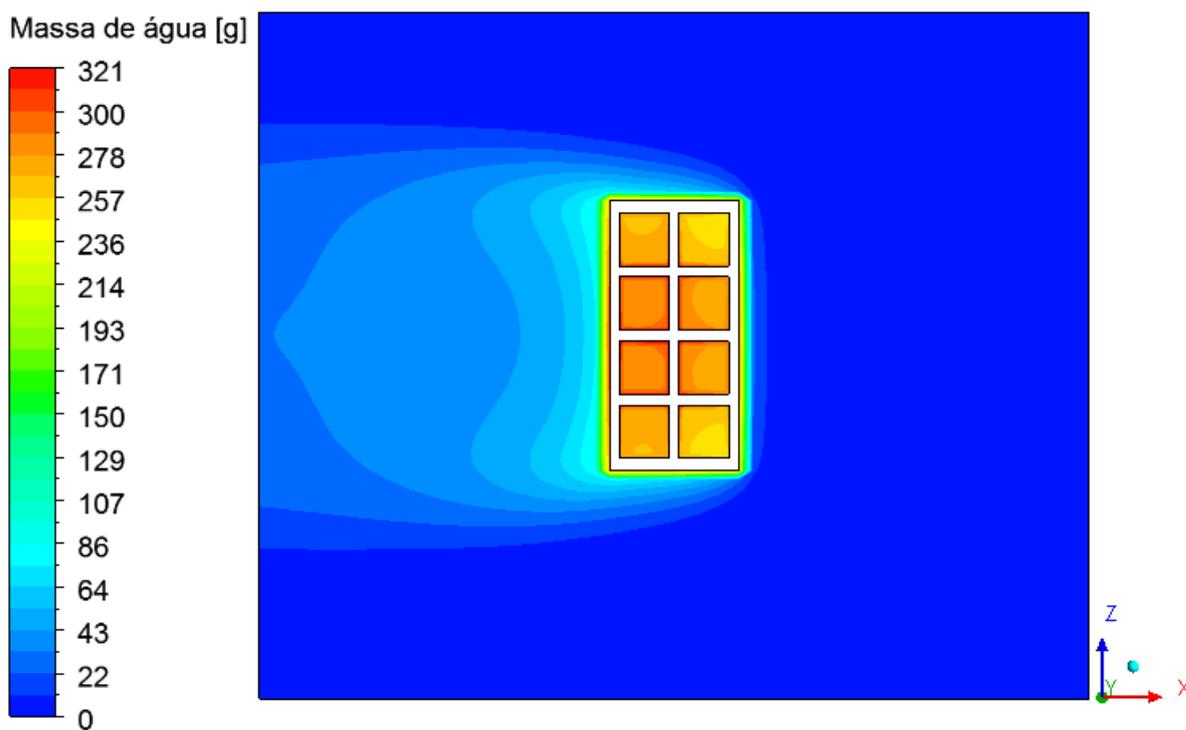


Figura 4.145: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C ($t = 60$ min).

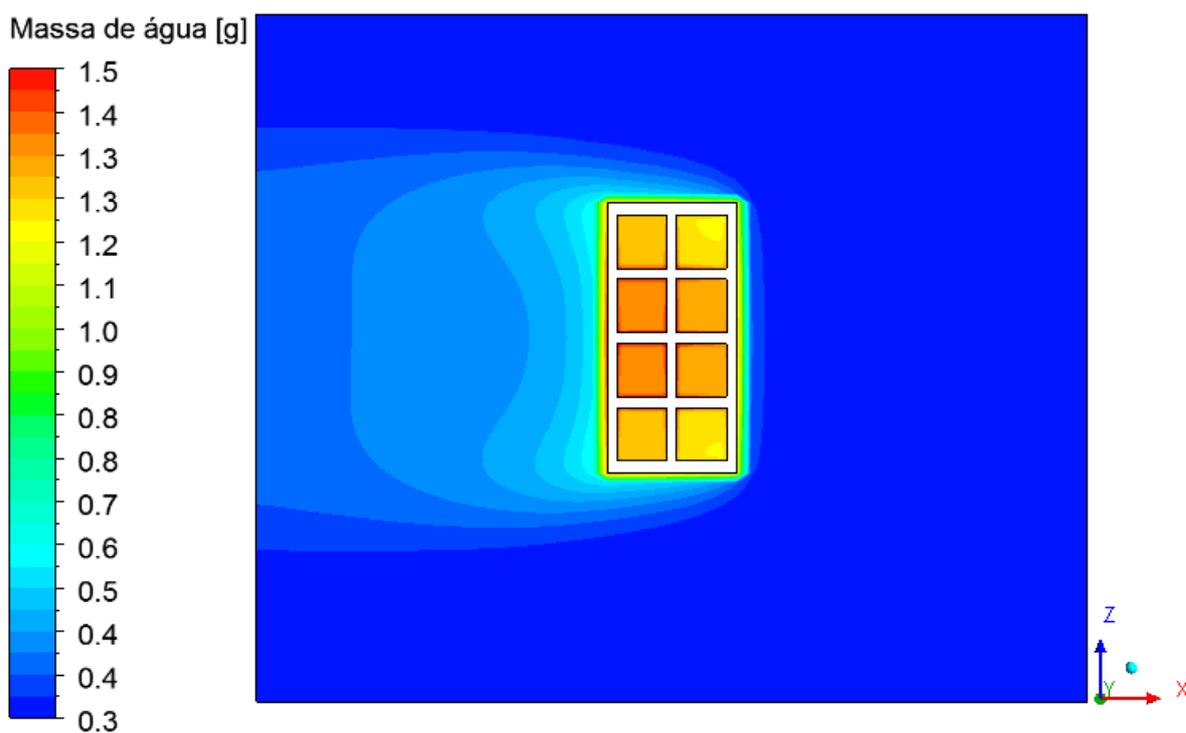


Figura 4.146: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C ($t = 950$ min).

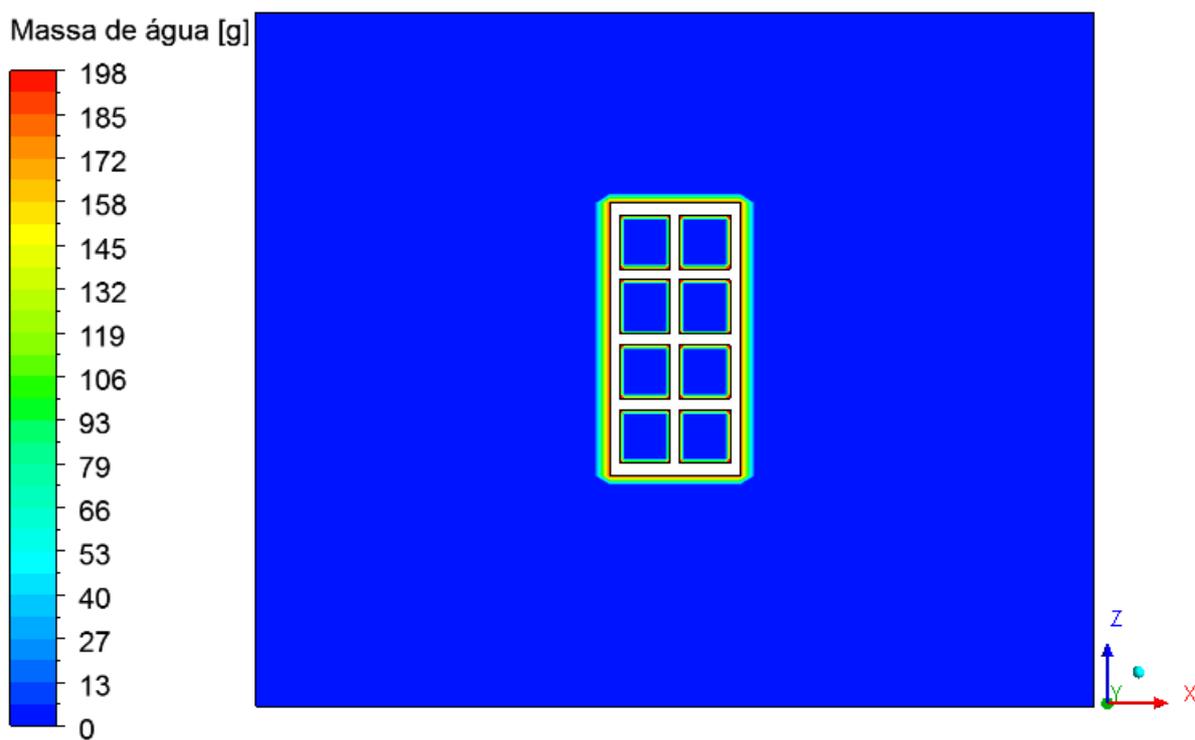


Figura 4.147: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C ($t = 0$ min).

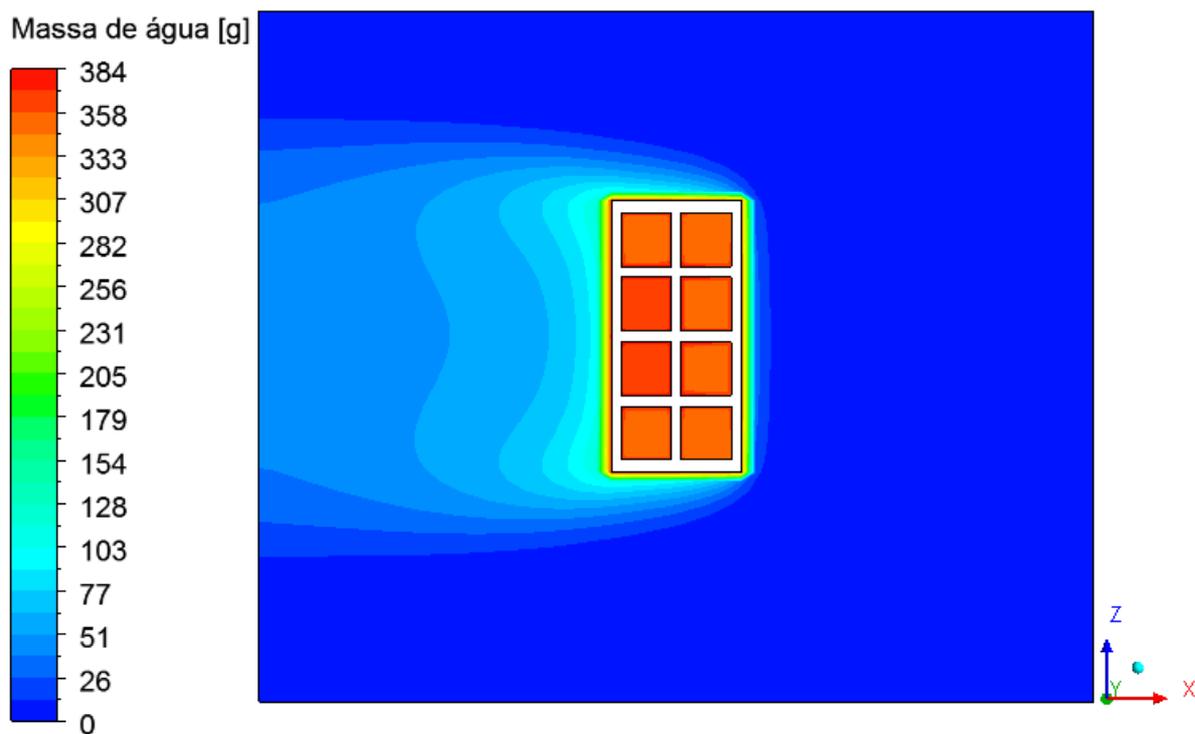


Figura 4.148: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C ($t = 10$ min).

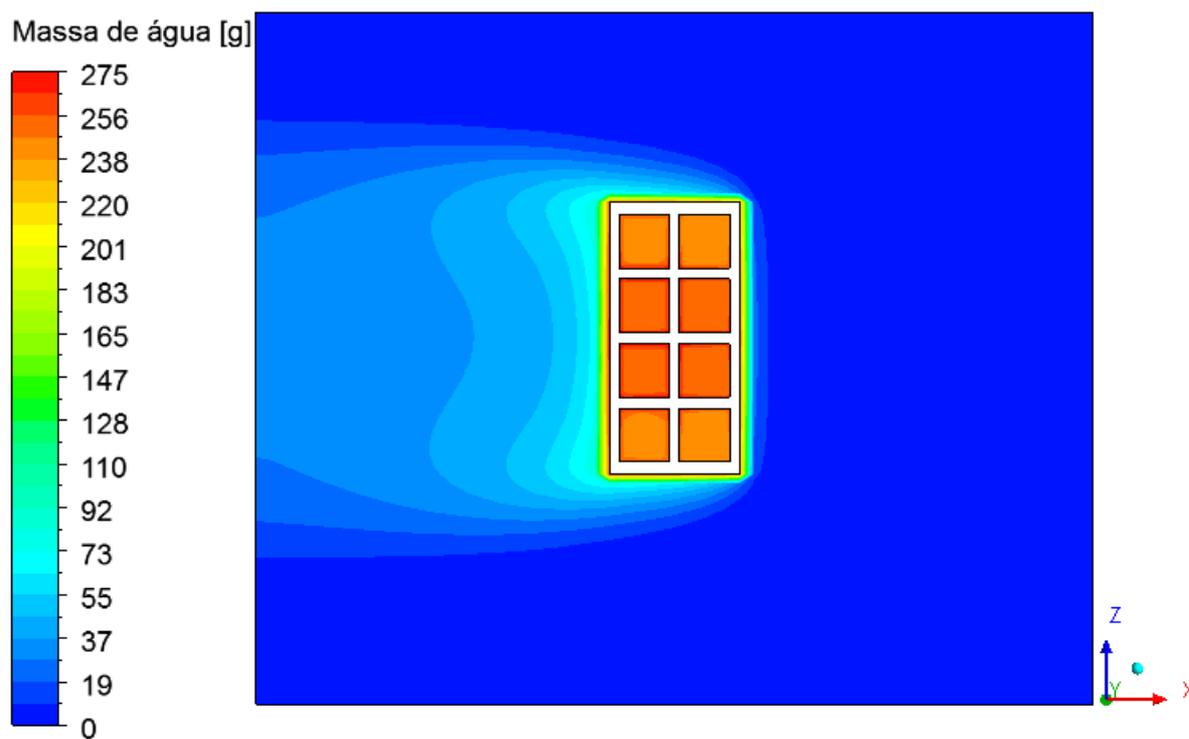


Figura 4.149: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 60 min).

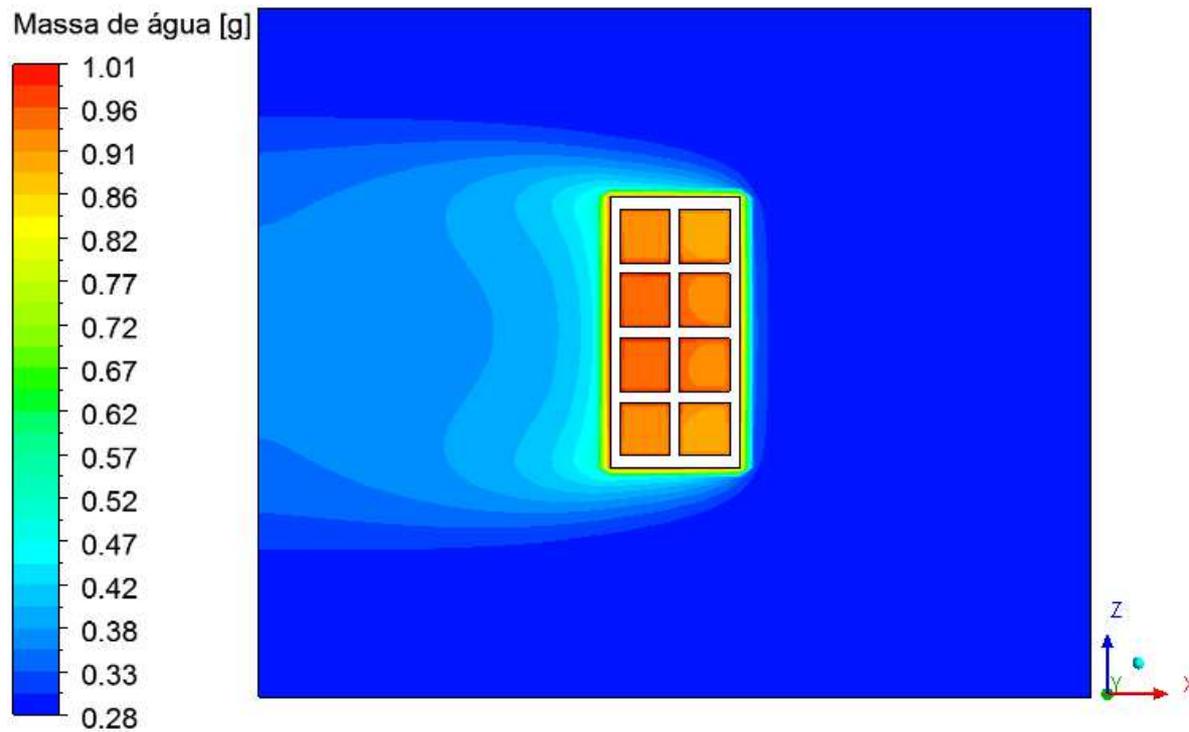


Figura 4.150: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem 80°C (t = 90 min).

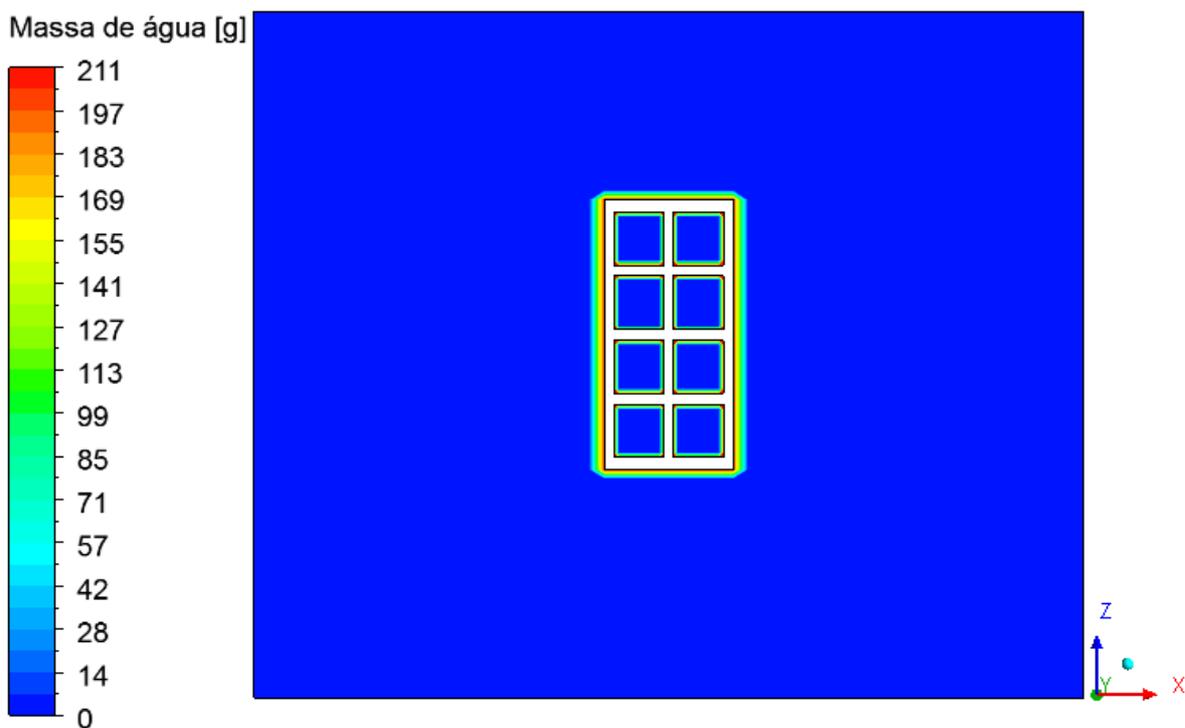


Figura 4.151: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 0 min).

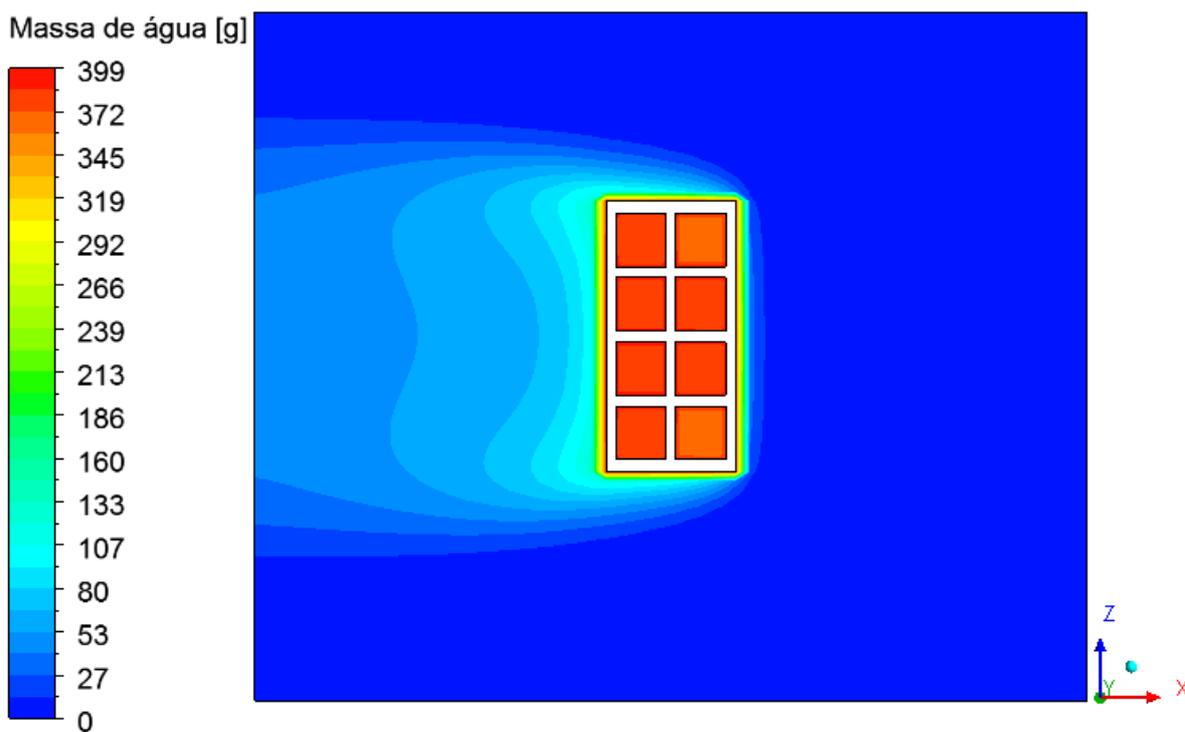


Figura 4.152: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 10 min).

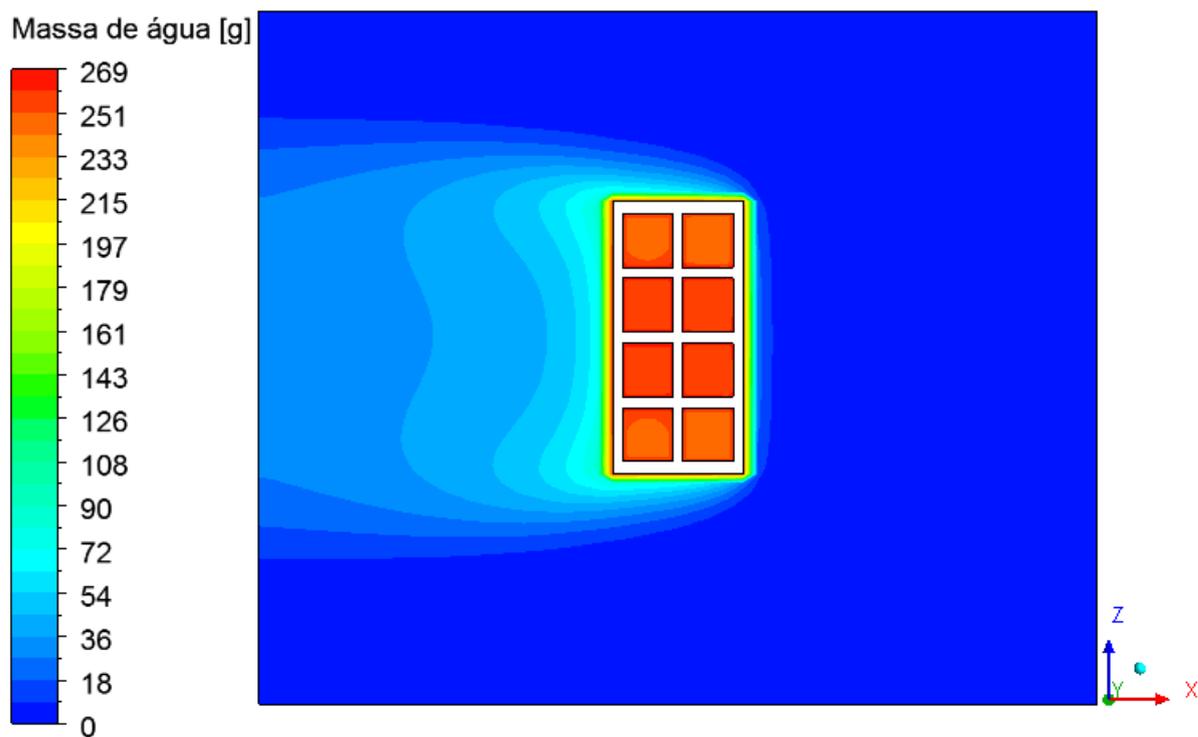


Figura 4.153: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 60 min).

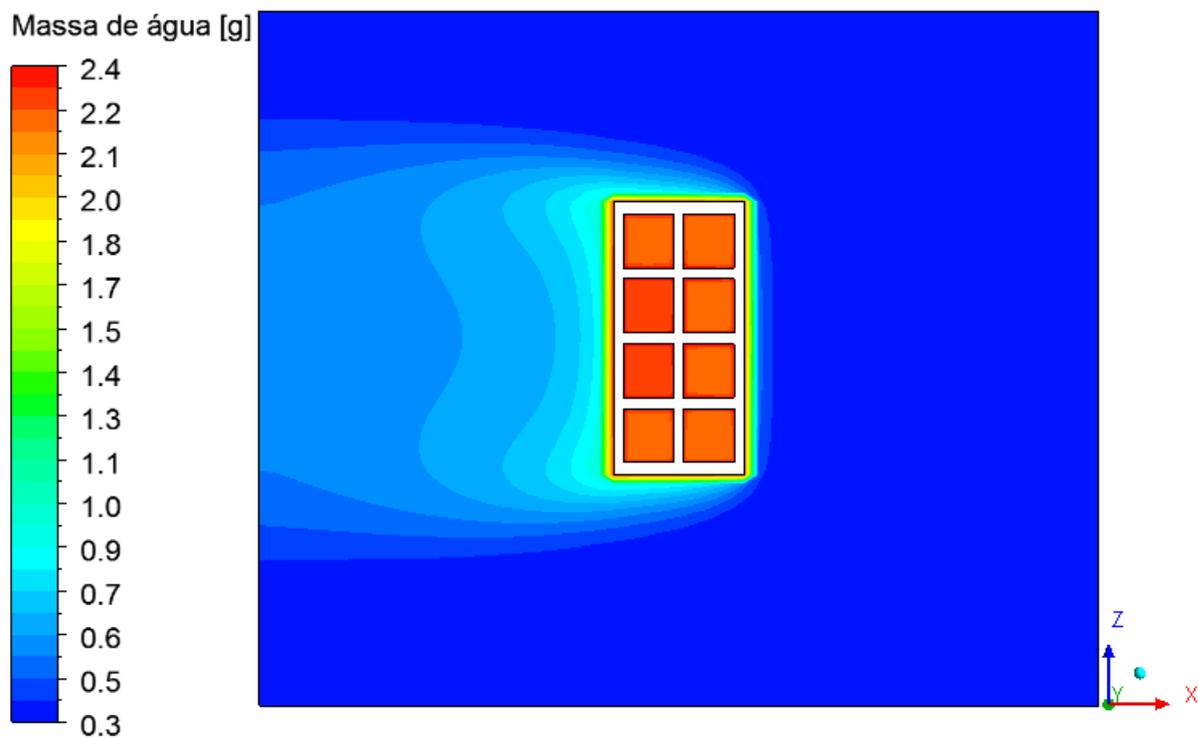


Figura 4.154: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 690 min).

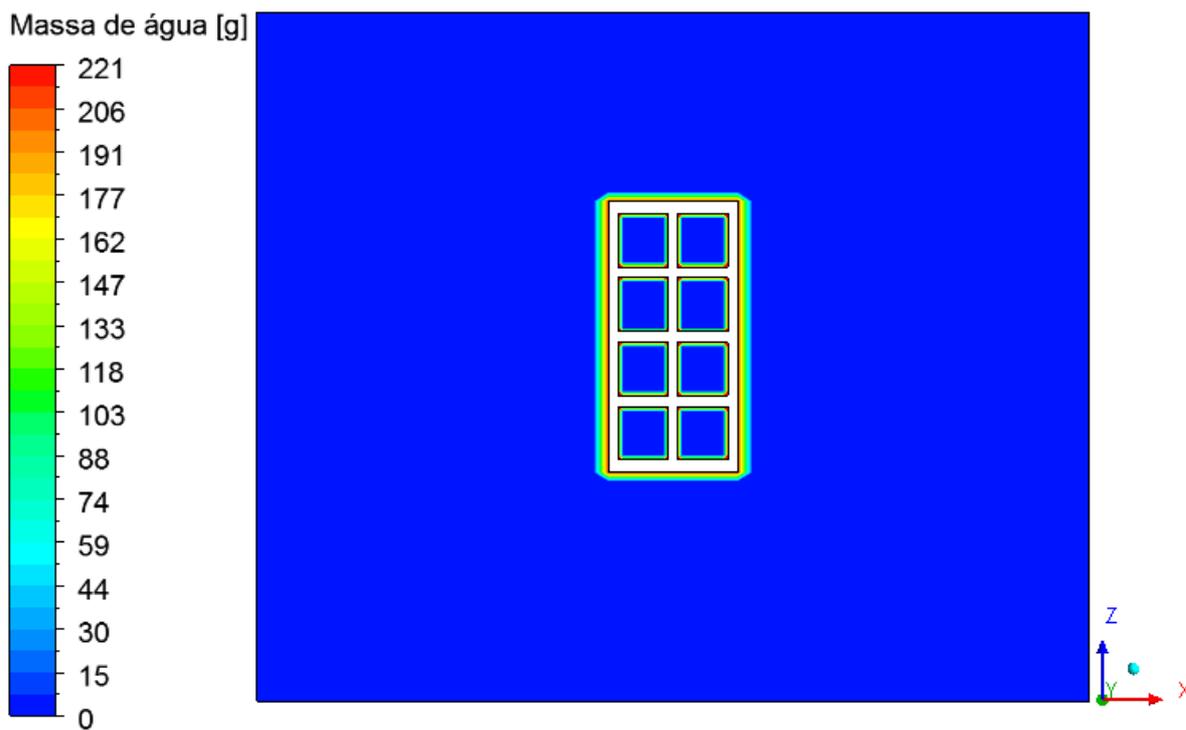


Figura 4.155: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C ($t = 0$ min).

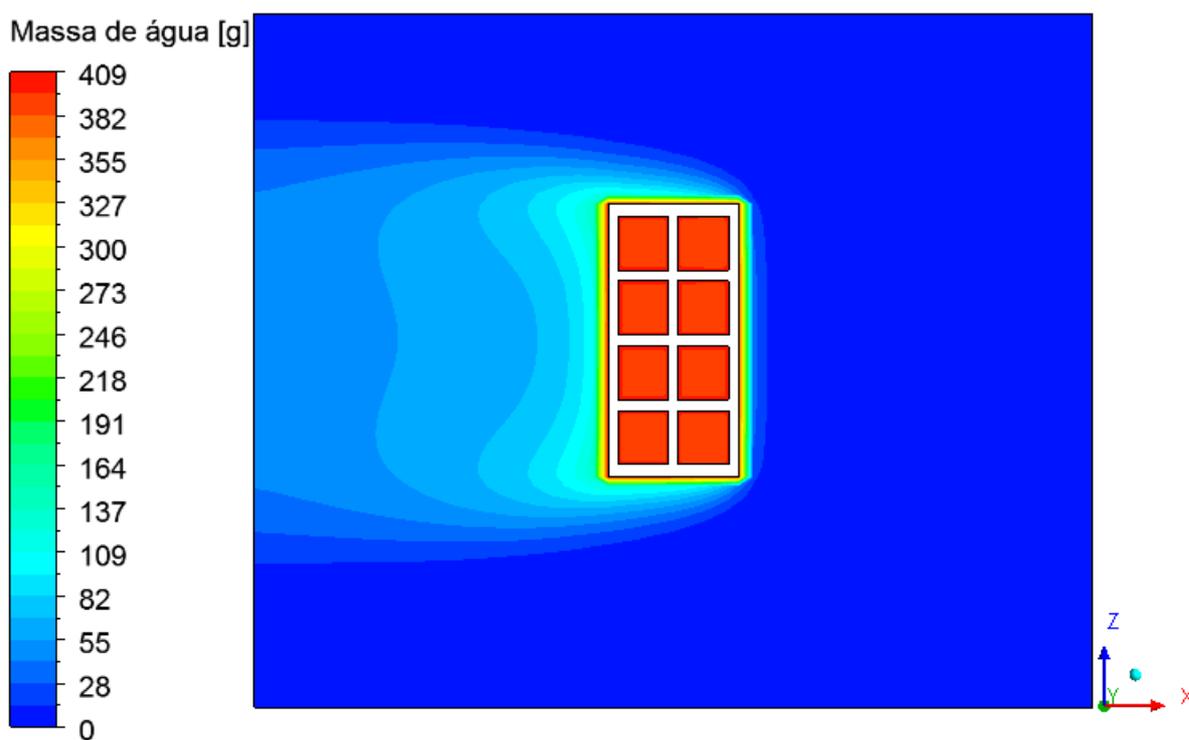


Figura 4.156: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C ($t = 10$ min).

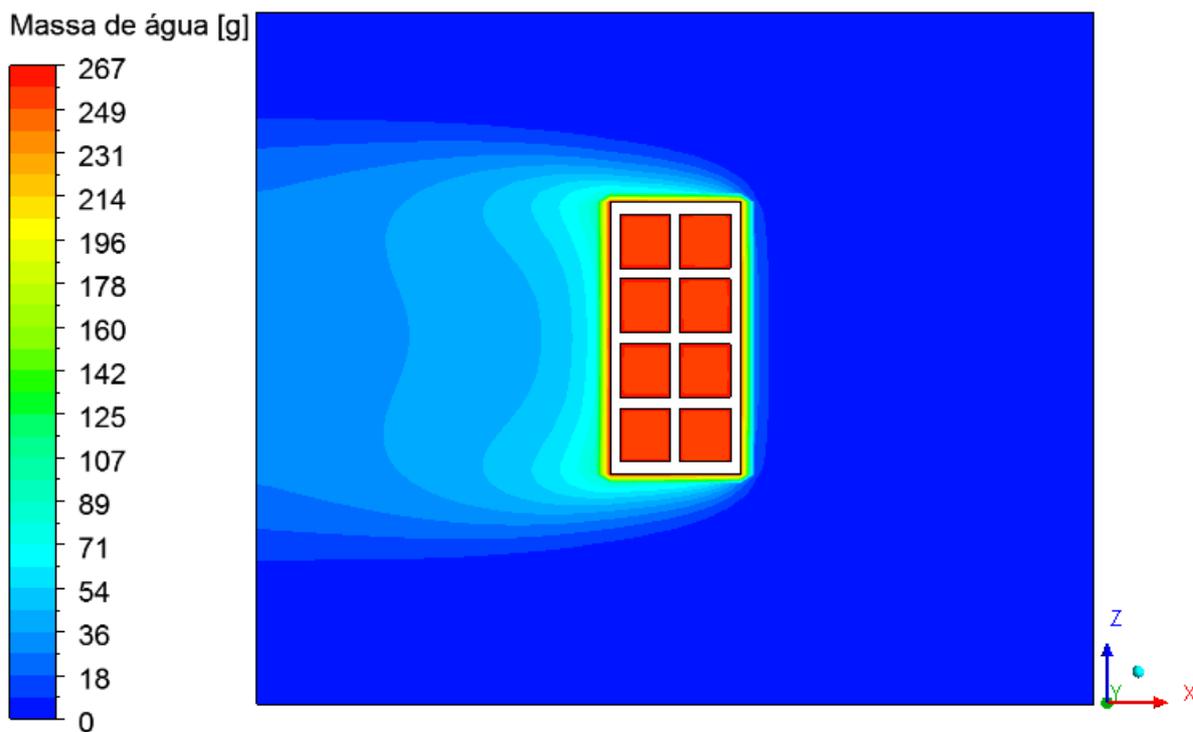


Figura 4.157: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 60 min).

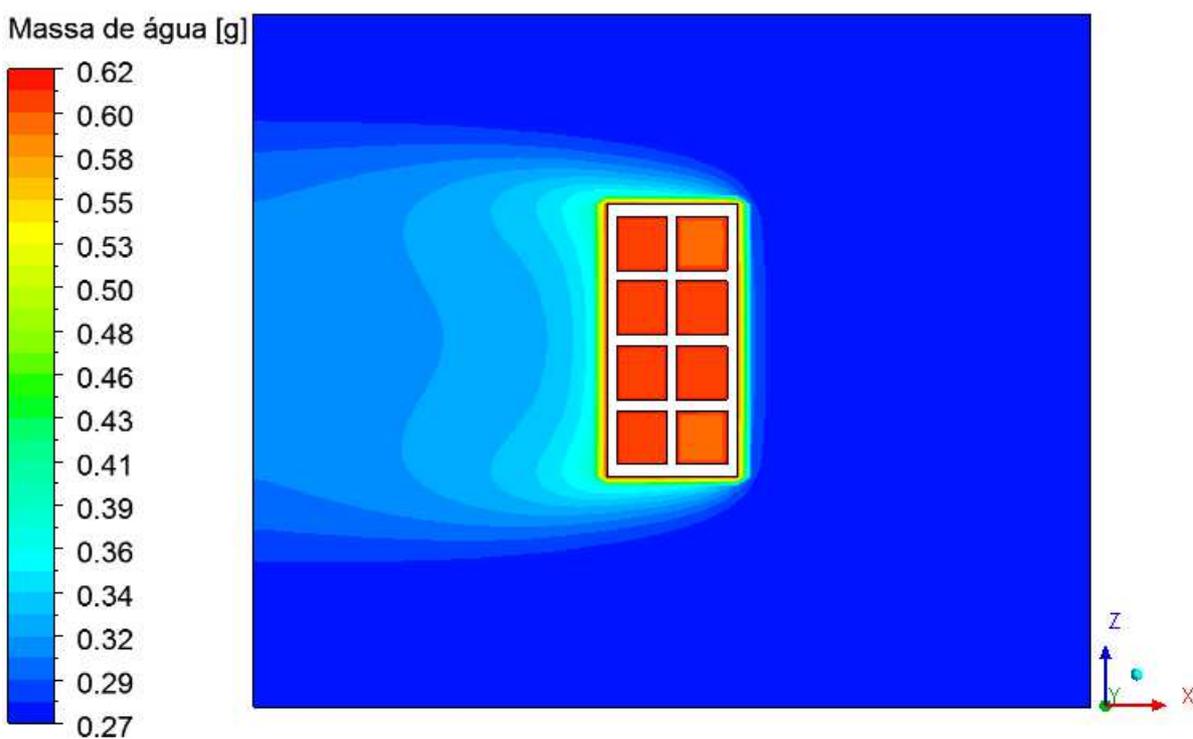


Figura 4.158: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 860 min).

4.2.5.3 Campo de velocidade do ar

Para todas as simulações, o ar escoa com a mesma vazão e seu regime de escoamento é praticamente permanente, sendo, portanto, suficiente mostrar o campo de velocidade apenas do instante inicial ($t = 10$ min) de cada simulação numérica. Nas Figuras 4.159 a 4.164 estão ilustrados os campos de velocidade do ar no interior da estufa para a secagem a 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. Nota-se que o ar atinge maiores velocidades nas regiões acima e abaixo do tijolo. A esquerda do objeto e na região vazada há zonas de menores velocidades, que correspondem à localização onde as trocas térmica e mássica são mais lentas. A velocidade do ar é um dos fatores que tem forte influência na cinética de aquecimento e de secagem (quando a secagem ocorrer a taxa constante).

Verifica-se ainda que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maiores são os valores da velocidade do ar no interior da estufa. Especialmente nas regiões próximas aos vértices frontais do tijolo.

Tendo em vista os baixos valores da velocidade do ar, a força de arraste é muito pequena. Assim, a principal função do escoamento do ar é aquecer o sólido, evaporar a água da superfície do sólido e retirá-la da camada limite de concentração. Observa-se ainda que o ar está quase parado na região posterior do tijolo, devido ao efeito de forma. O tijolo possui uma grande área frontal.

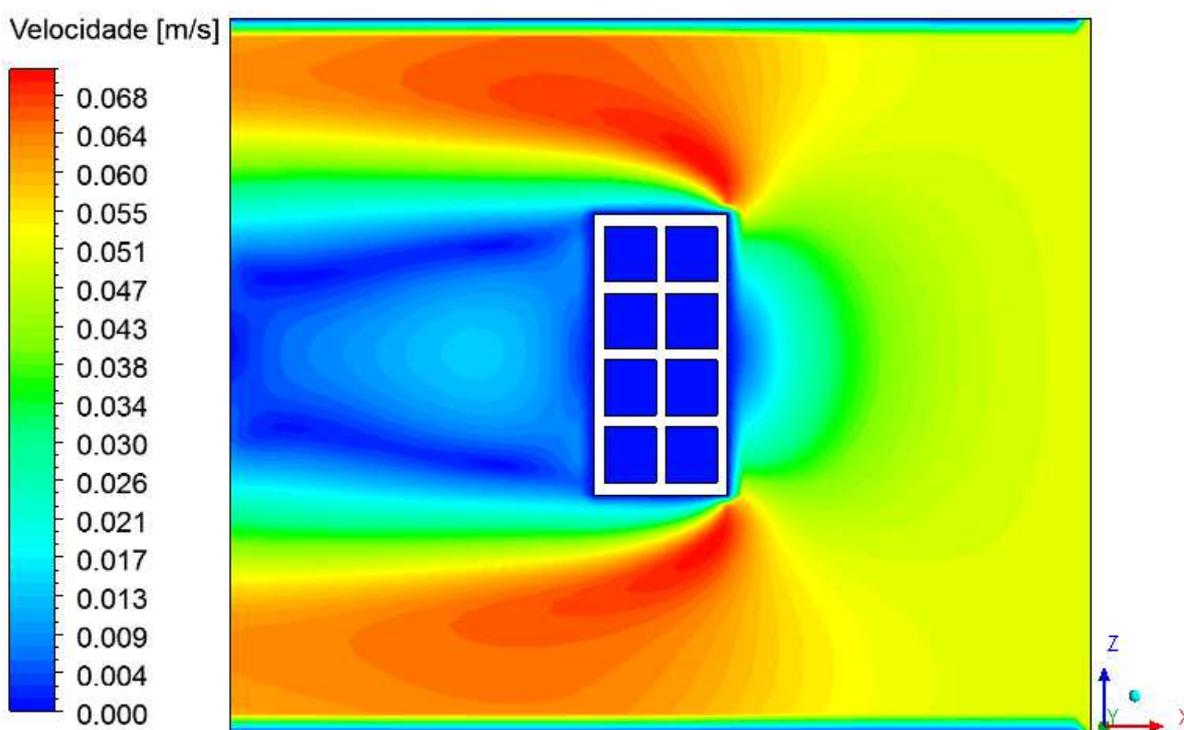


Figura 4.159: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C ($t = 10$ min).

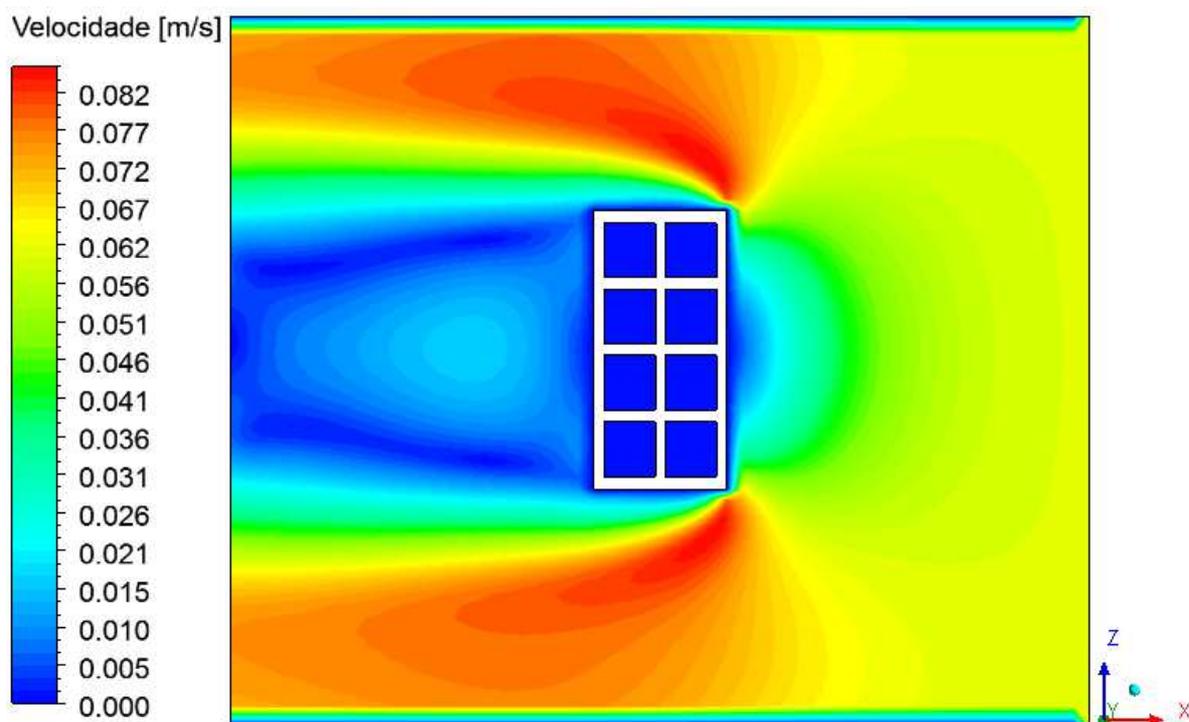


Figura 4.160: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C ($t = 10$ min).

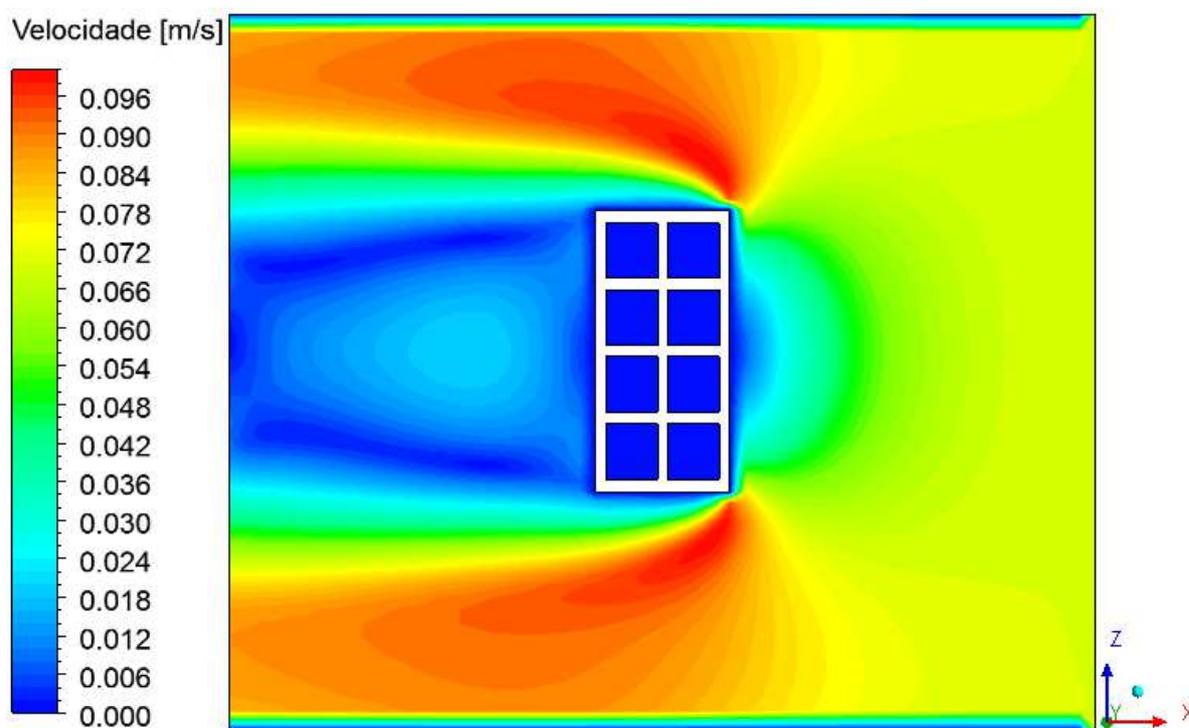


Figura 4.161: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 70°C ($t = 10$ min).

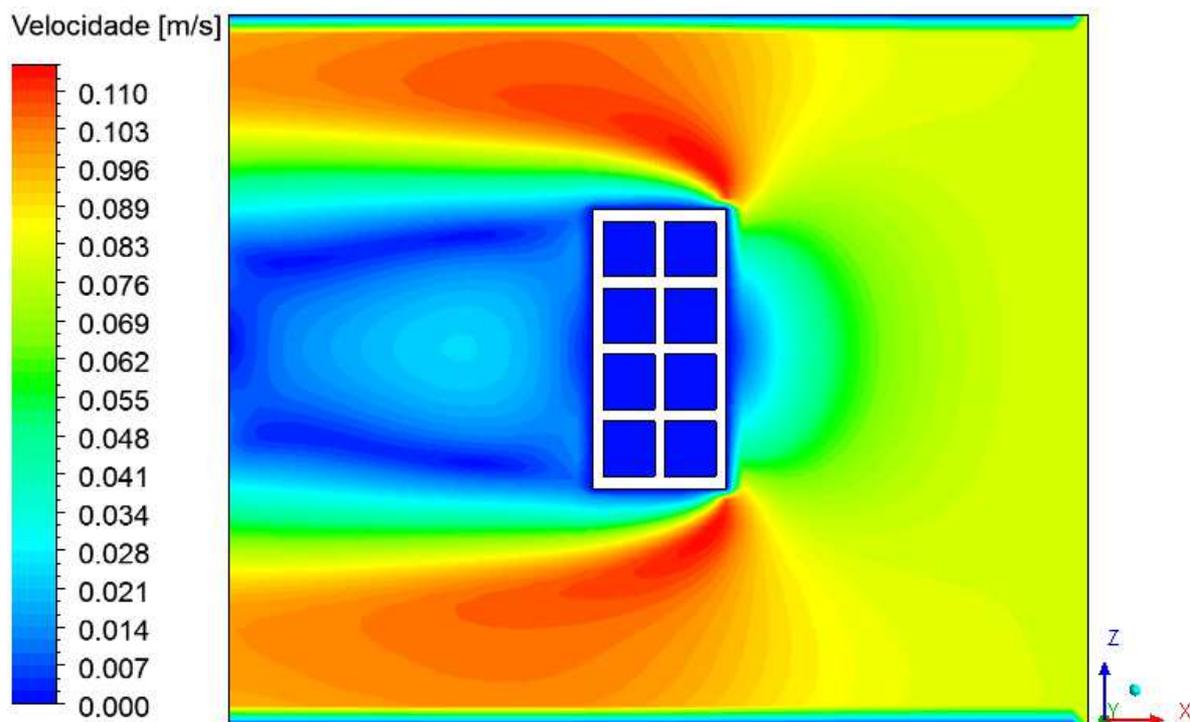


Figura 4.162: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C (t = 10 min).

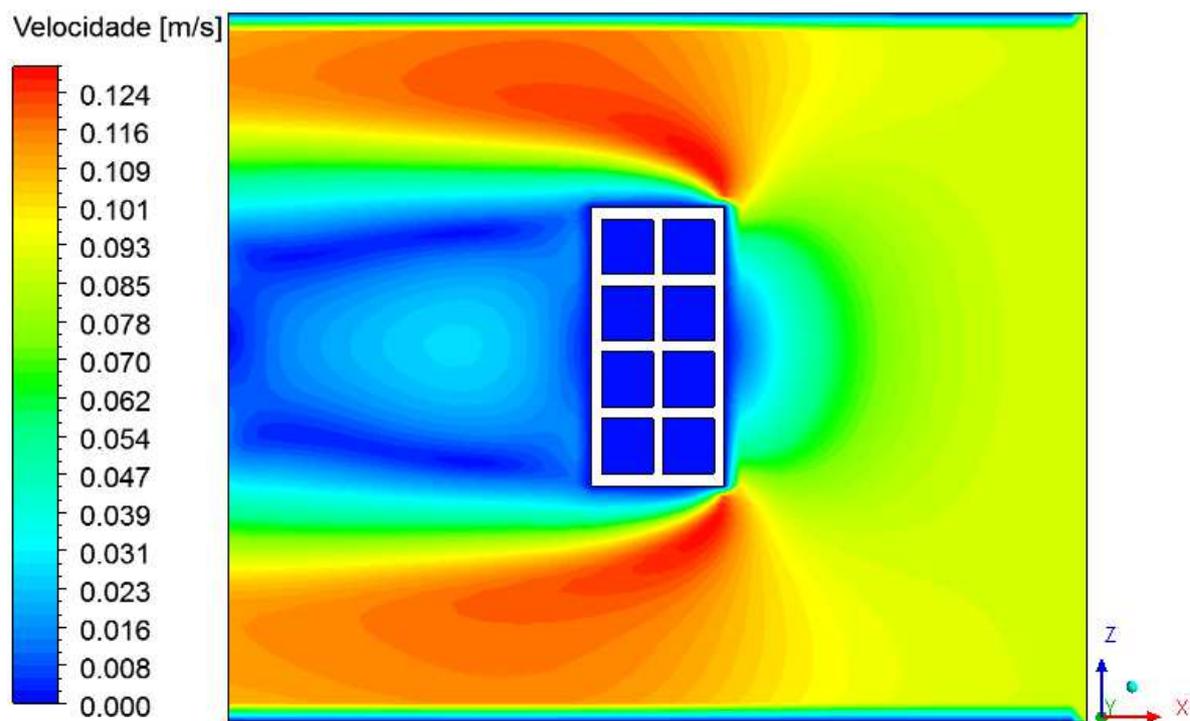


Figura 4.163: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 90°C (t = 10 min).

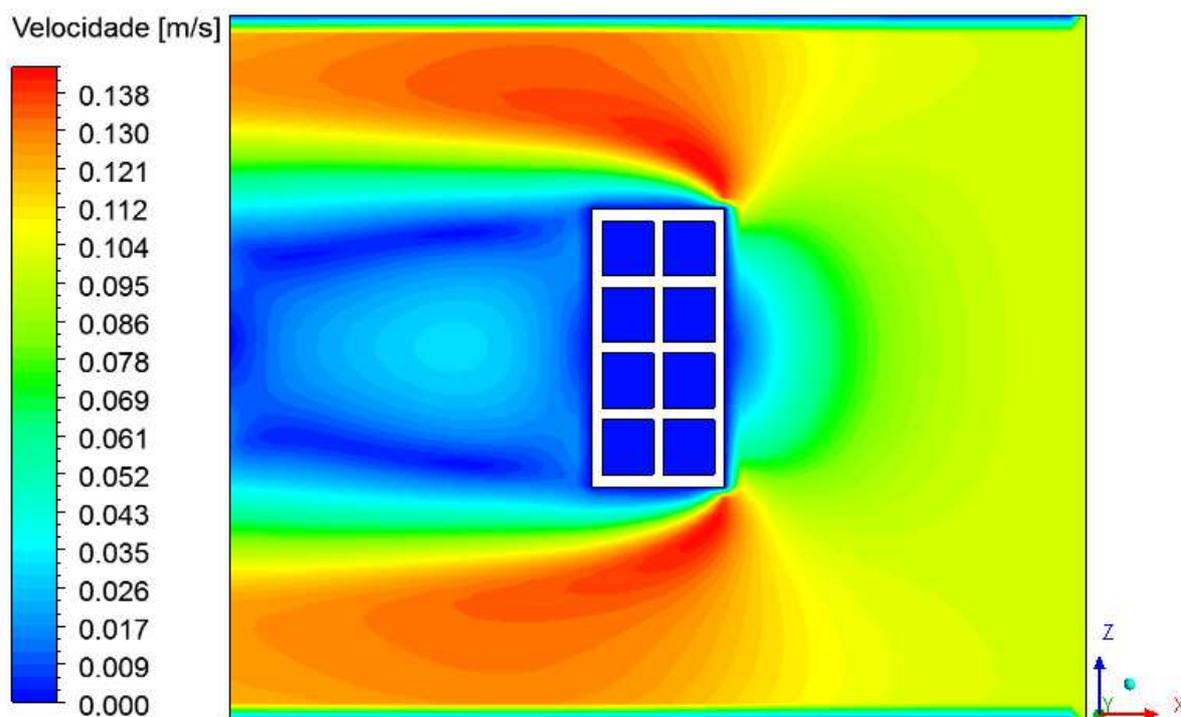


Figura 4.164: Campo de velocidade do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C (t = 10 min).

Para uma melhor compreensão do percurso que o ar realiza no interior da estufa, um campo de vetores para temperatura de secagem de 50°C (Figura 1.165) e de 100°C (Figura 1.166) e linhas de corrente para secagem a 50°C (Figura 1.167) foram construídos para 10 minutos de secagem. Pelo fato da velocidade variar muito pouco para as diferentes temperaturas de secagem, e, devido ao fluxo de vapor de água do tijolo para o ar ser lento e não influenciar no campo de velocidade, torna-se desnecessário apresentar campo vetorial e linhas de corrente para as demais temperaturas. Além disso, o estudo sobre esta variável é puramente qualitativa.

Lembrando que o ar escoava da direita para a esquerda, nota-se a formação de vórtices após o ar passar pelo tijolo, evidenciando a importância da escolha adequada do modelo de turbulência na modelagem matemática.

Na Figura 4.166 é possível identificar o ponto de separação do escoamento na região frontal do tijolo e, com ele, o ponto de estagnação (ponto de velocidade nula).

Para entender como ocorre o escoamento do ar no interior dos orifícios do tijolo, foram construídos, a partir dos Planos XY e YZ (Figura 4.168), os campos de vetores (Figuras 4.169 e 4.170) e as linhas de corrente para secagem a 100°C (Figuras 4.171 e 4.172).

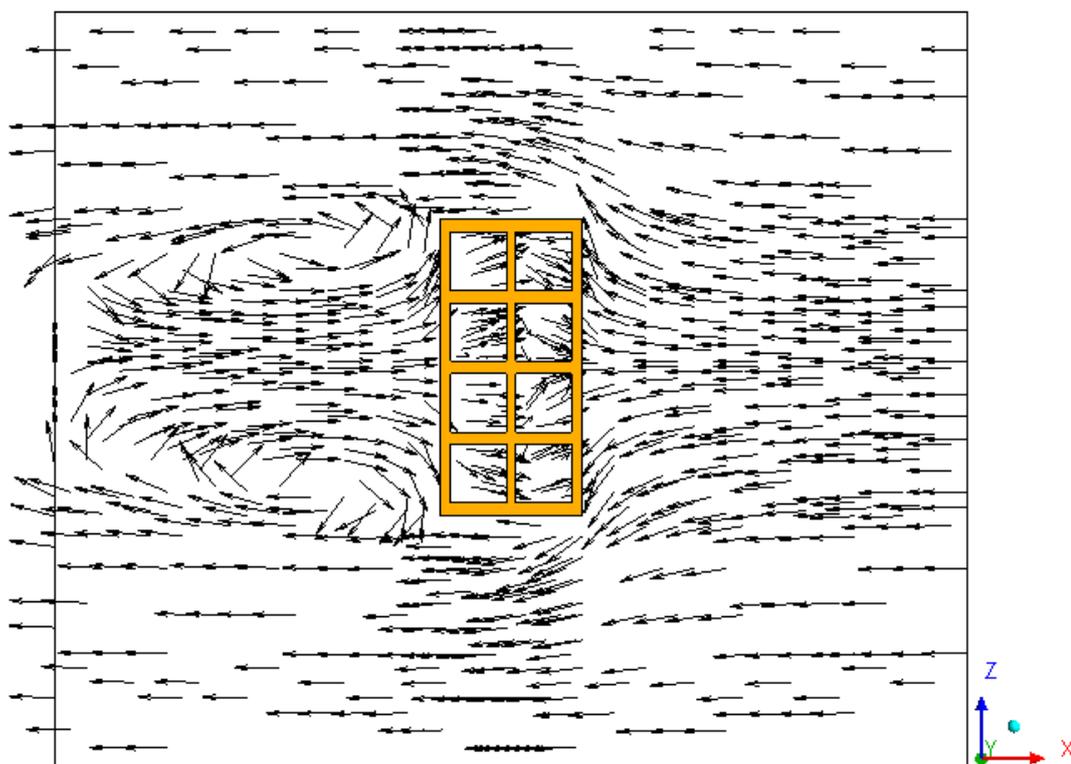


Figura 4.165: Campo vetorial do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C ($t = 10$ min).

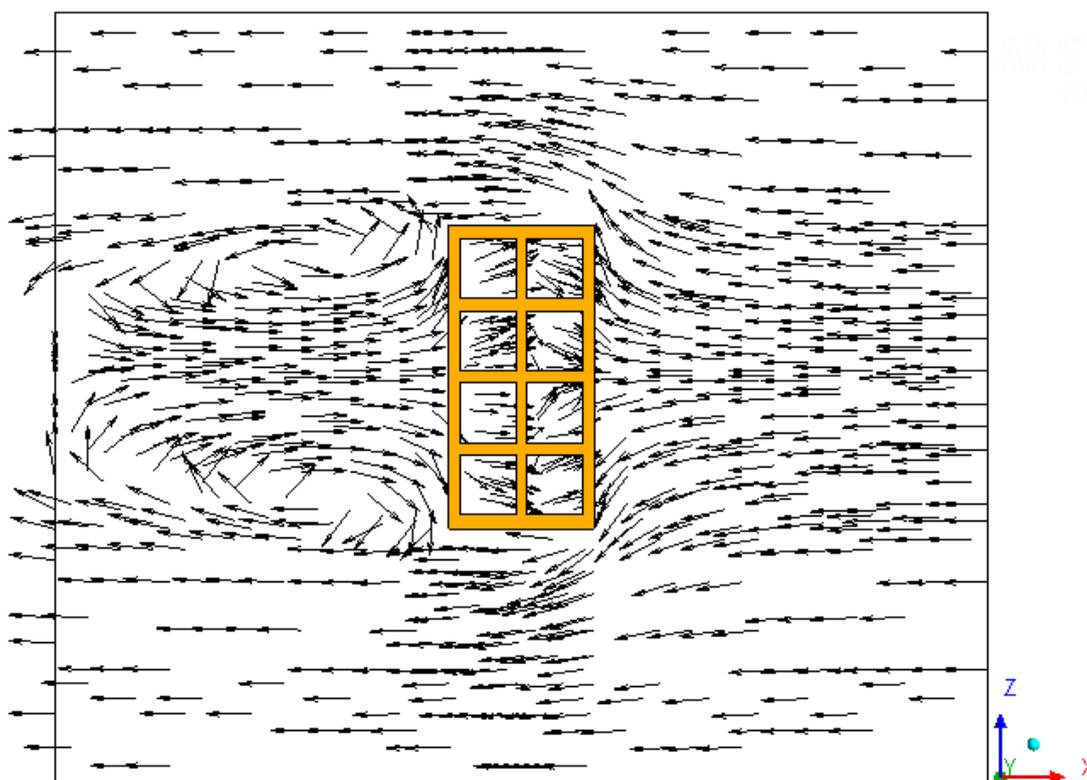


Figura 4.166: Campo vetorial do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C ($t = 10$ min).

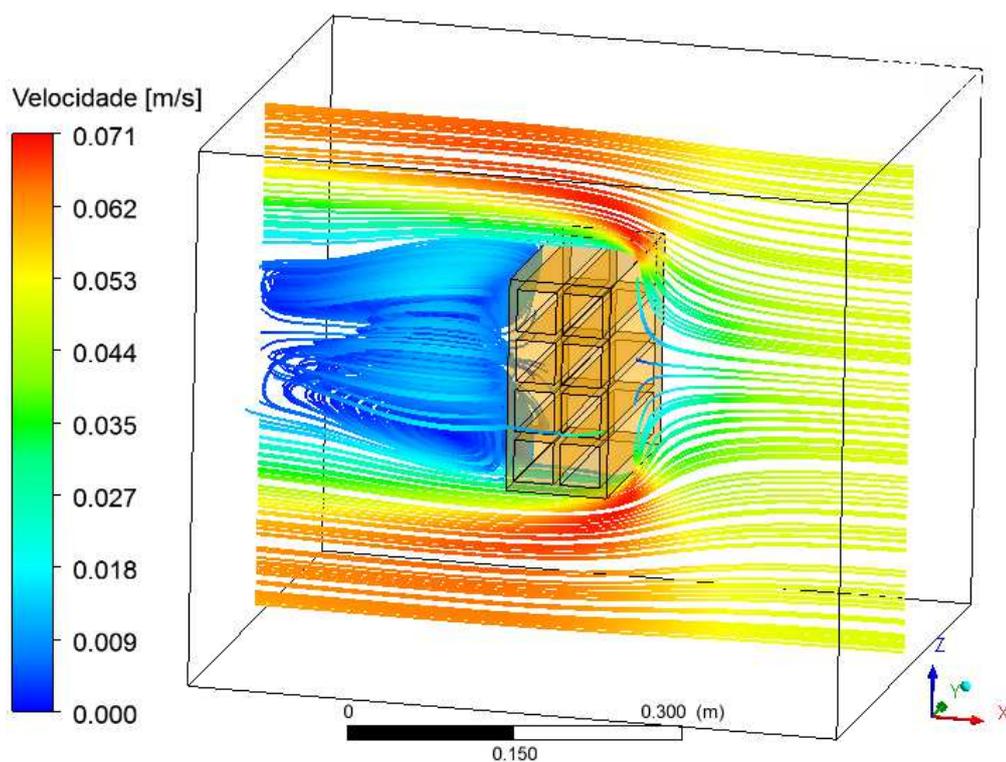


Figura 4.167: Linhas de corrente no interior da estufa para a secagem a 50°C ($t = 10$ min).

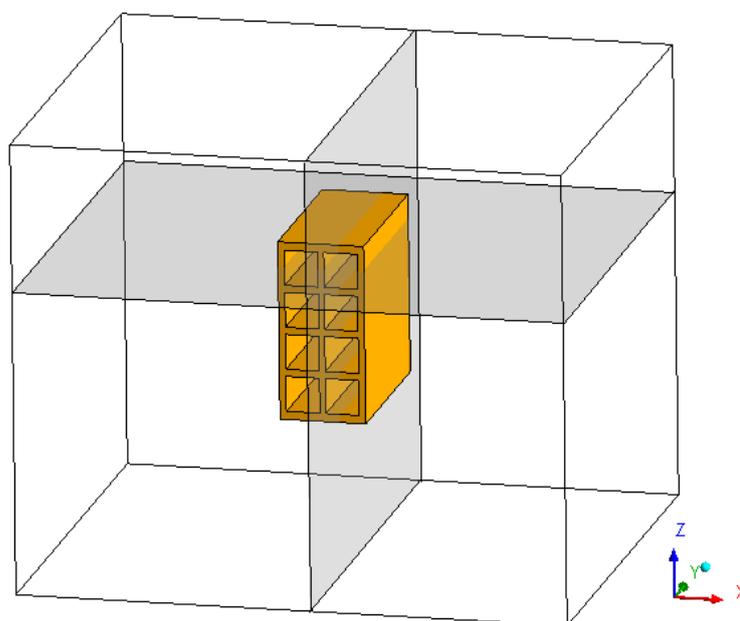


Figura 4.168: Planos XY e YZ para as linhas de corrente.

Note que no interior dos orifícios do tijolo há zonas de turbulência, principalmente nas entradas, ocasionando recirculação do ar e dificultando a sua saída e, conseqüentemente, o aquecimento e a secagem do tijolo. Na Figura 4.173 é possível observar melhor a recirculação do ar.

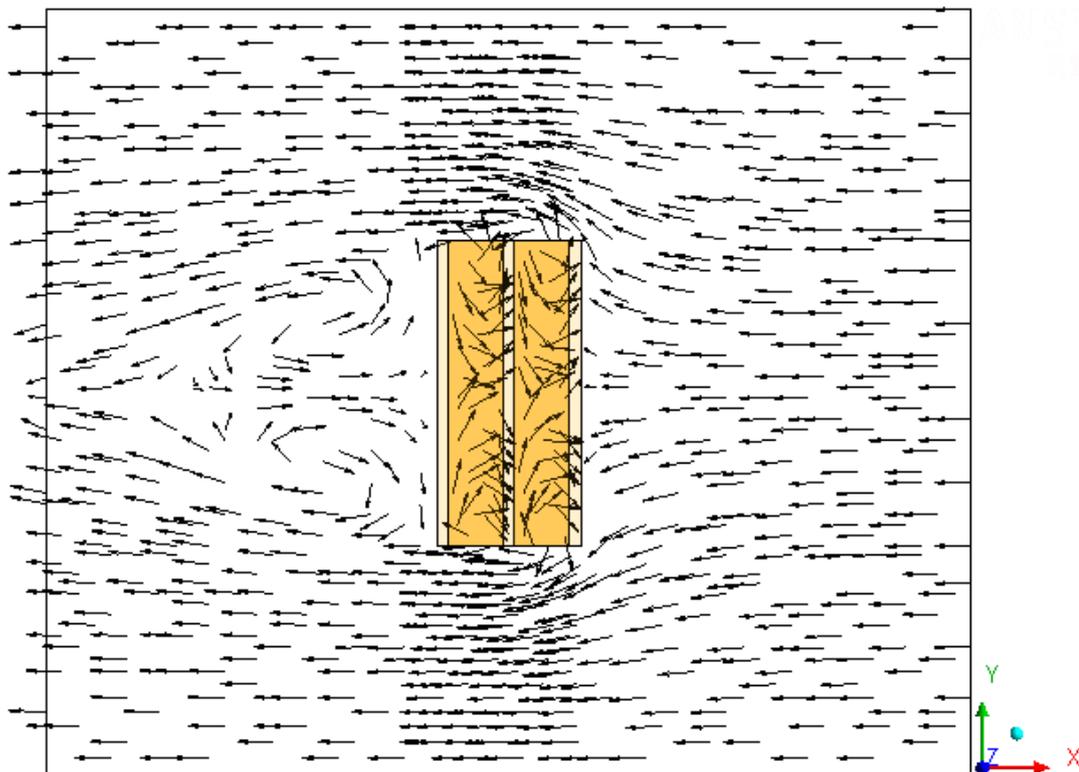


Figura 4.169: Campo vetorial do ar no interior da estufa (Plano XY) para a secagem a 100°C ($t = 10$ min).

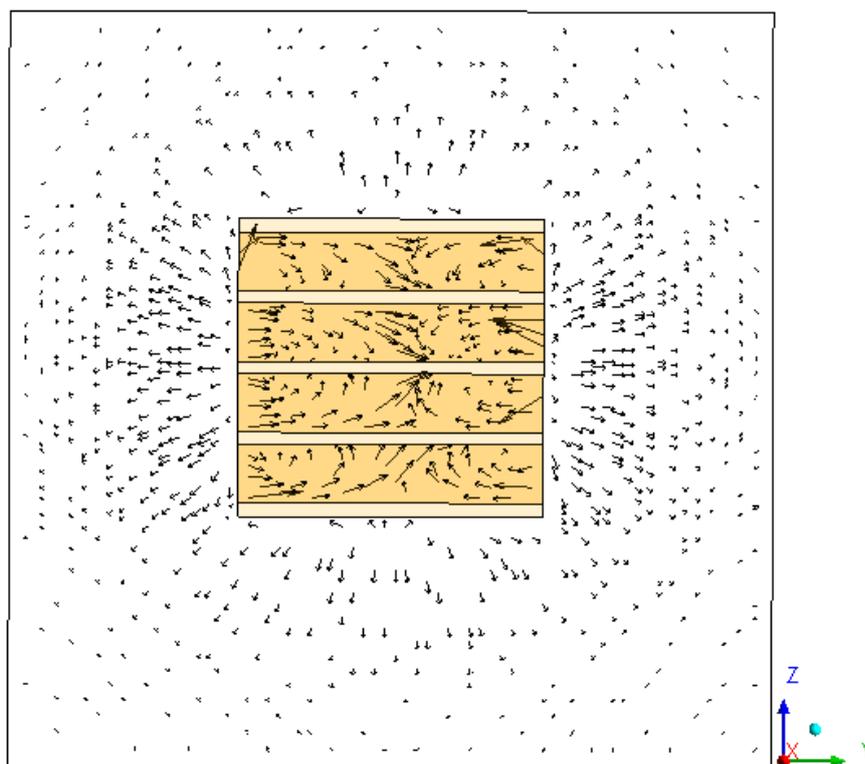


Figura 4.170: Campo vetorial do ar no interior da estufa (Plano YZ) para a secagem a 100°C ($t = 10$ min).

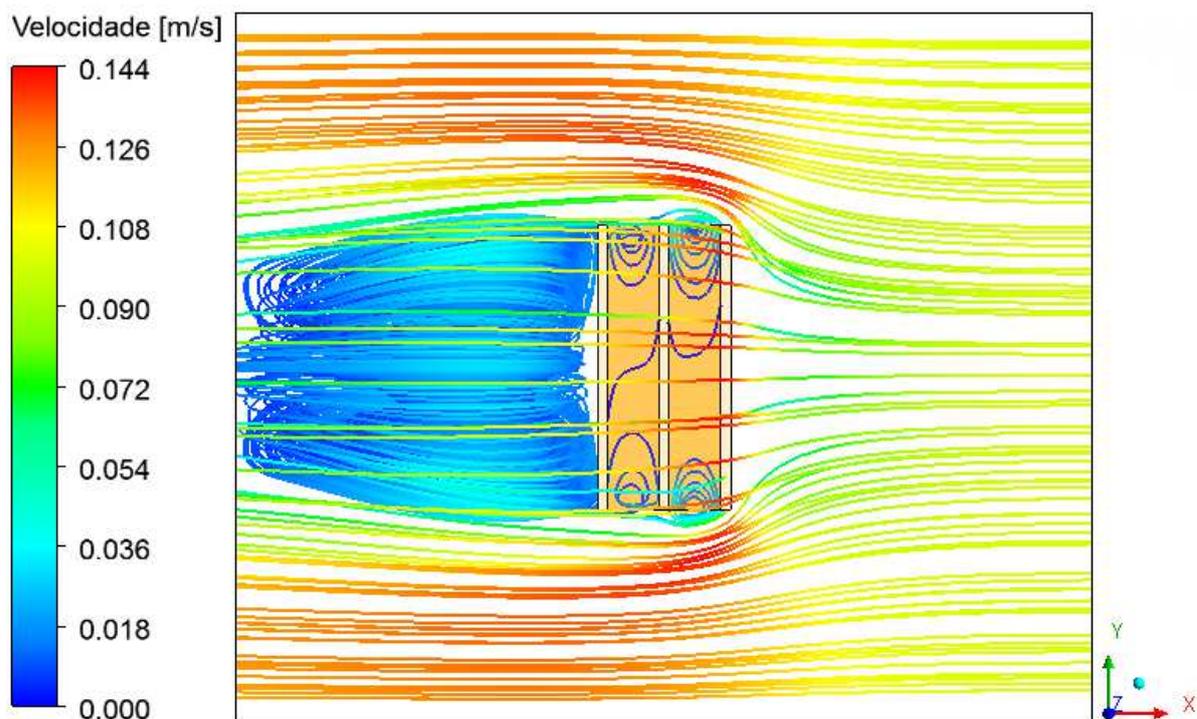


Figura 4.171: Linhas de corrente no interior da estufa (Plano XY) para a secagem a 100°C (t = 10 min).

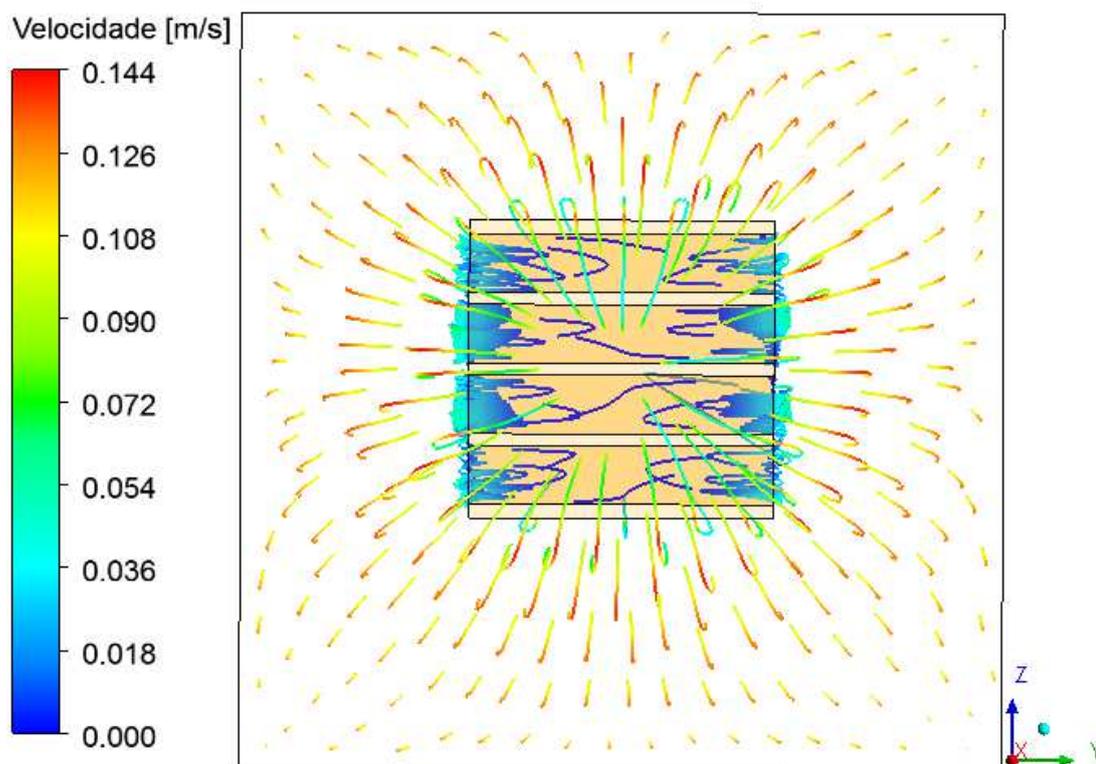


Figura 4.172: Linhas de corrente no interior da estufa (Plano YZ) para a secagem a 100°C (t = 10 min).

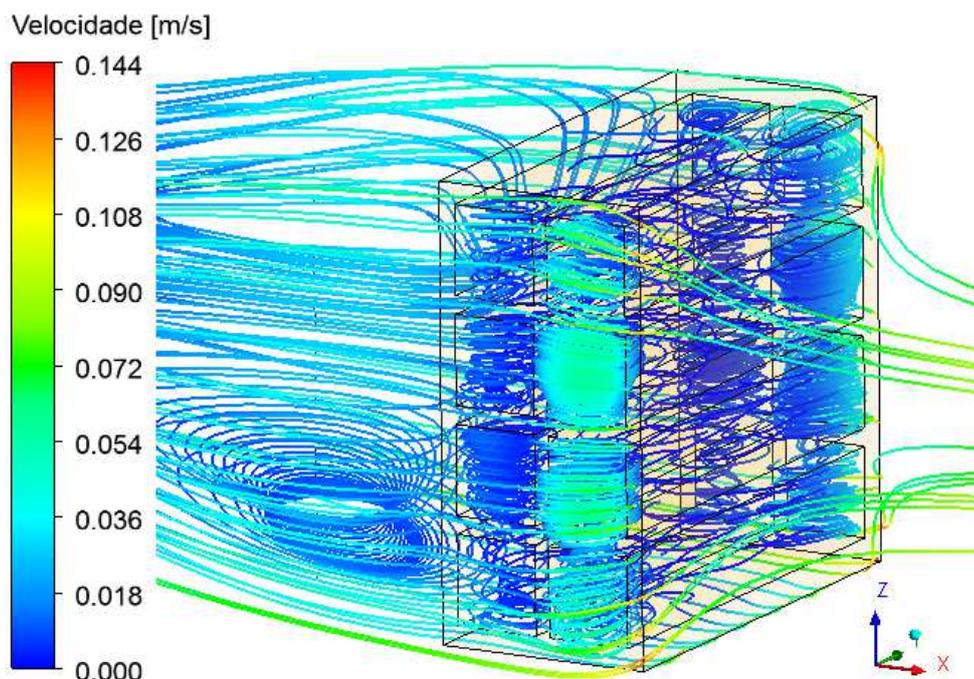


Figura 4.173: Detalhes das linhas de corrente na entrada dos orifícios do tijolo para a secagem a 100°C (t = 10 min).

4.2.5.4 Campo de pressão

Em virtude do escoamento ocorrer com uma velocidade baixa e também do processo de difusão de massa no material ser lento, praticamente não há mudança da pressão no interior da estufa. Pelo fato de que a pressão adotada ser a mesma para a secagem em todas as temperaturas, apresenta-se o campo de pressão apenas para a temperatura de 50°C (t = 10 min), como ilustra a Figura 4.174. Verifica-se que a variação de pressão é mínima entre a entrada e a saída da estufa.

Uma alternativa para conseguir visualizar uma mudança infinitesimal na pressão é construir o campo do gradiente de pressão, conforme Figura 4.175. Da análise desta figura, verifica-se que há uma pequena variação na pressão na região dos vértices do lado direito.

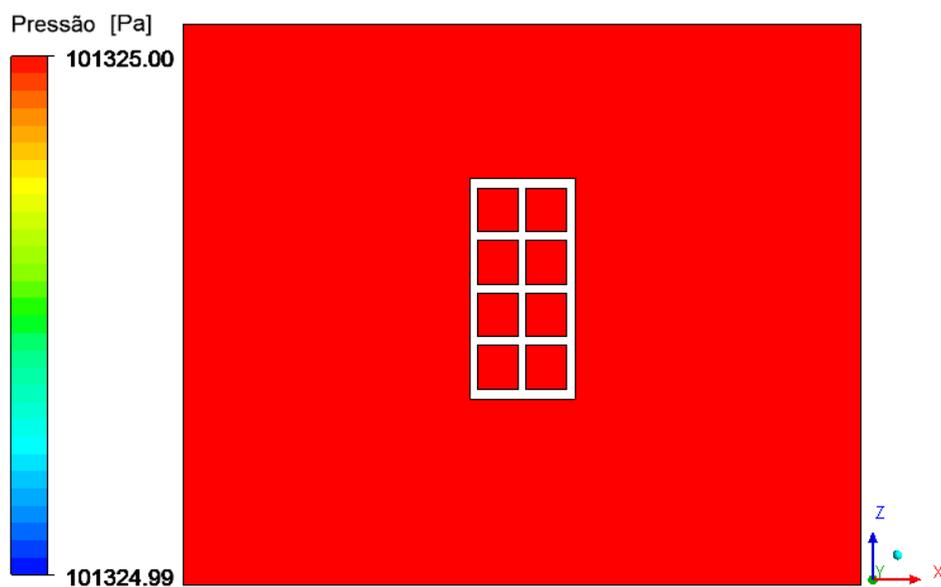


Figura 4.174: Campo de pressão no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 10 min).

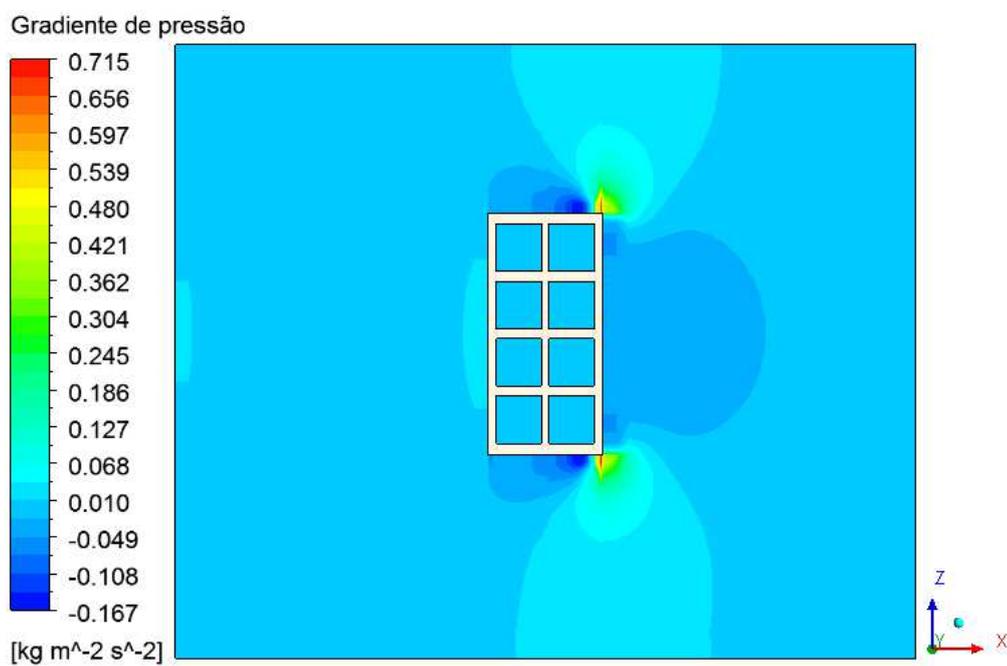


Figura 4.175: Campo de gradiente de pressão ao longo do eixo X no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 50°C (t = 10 min).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 Conclusões

De acordo com os resultados numéricos obtidos para secagem de tijolos cerâmicos vazados, pode-se concluir que:

- A modelagem matemática proposta foi adequada, e os resultados numéricos da temperatura no vértice dos tijolos e da massa de água perdida apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais;
- Quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais rápidas são as taxas de aquecimento e de secagem;
- Os coeficientes de transferência de calor e de massa, por convecção, e o coeficiente de difusão de massa aumentaram com o crescimento da temperatura de secagem;
- A elevação da difusividade com a temperatura seguiu a Lei de Arrhenius, em que se obteve a equação da difusividade de massa em função da temperatura, com um elevado coeficiente de determinação. A referida equação permite calcular valores de difusividade mássica entre temperaturas de 50 a 100°C sem necessariamente ter que realizar novos experimentos ou novas simulações numéricas;
- A partir das linhas traçadas no interior do tijolo foi possível obter as variações de temperatura e do teor de umidade. Observou-se que a temperatura cresce com o tempo de secagem, enquanto que a umidade diminuiu ao longo do processo, sendo mais intenso em altas temperaturas;
- Os campos de temperatura e do teor de umidade sobre a superfície do tijolo e em seu interior mostraram a forte dependência do comportamento da secagem com a direção do escoamento do ar no interior da estufa e das condições de secagem;
- Houve variações tanto de umidade quanto de temperatura na superfície do tijolo, evidenciando que uma condição de contorno convectiva é mais apropriada para este tipo de secagem;
- No aquecimento dentro da estufa, o ar quente transfere calor para o tijolo cerâmico e, ao passar pelo material, sofre uma leve diminuição em sua temperatura e se

umidifica, principalmente próximo a superfície do tijolo e dentro das camadas limite térmica, e de concentração;

- O campo de velocidade no interior da estufa permitiu observar o comportamento da velocidade do ar durante a passagem pelo tijolo. Na região vazada do tijolo, o ar escoava com uma velocidade inferior às demais regiões do domínio, o que justifica o acúmulo maior de umidade e a baixa temperatura observados no campo de massa de água e de temperatura no ar;
- O ar provoca a formação de vórtices ao passar pelo tijolo cerâmico, evidenciando a importância de escolher um modelo de turbulência na modelagem matemática;
- Devido à baixa velocidade de escoamento, a pressão no ar é praticamente invariável, fato confirmado pelo campo de pressão no ar.

5.2 Sugestões para futuras pesquisas

Como sugestões para futuros trabalhos pode-se citar:

- Estudar as tensões térmicas e hídricas em tijolos cerâmicos;
- Modificar a posição do tijolo no interior da estufa e analisar como ela influencia nas cinéticas de aquecimento e de secagem;
- Estudar a secagem do tijolo cerâmico considerando propriedades termo-físicas e de massa variáveis;
- Analisar o efeito da umidade relativa do ar nas cinéticas de secagem e aquecimento do tijolo;
- Aplicar a modelagem matemática em outros meios de secagem, como por exemplo estufas maiores e à materiais com diferentes composições químicas;
- Realizar a secagem simultânea de dois ou mais tijolos para avaliar os novos campos de temperatura e de umidade do ar no interior da estufa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCERAM. **Informações Técnicas - Processos De Fabricação**. Disponível em: <<https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>>. Acesso em 09 de Outubro de 2019.

ALMEIDA, G. S. **Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 189f, 2009.

ALMEIDA, G. S.; SILVA, J. B.; SILVA, C. J.; SWARNAKAR, R.; NEVES, G. A.; 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, n. 1-2, 2013.

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, n. 11, p. 104-109, 2016.

ANFACER. **História da cerâmica**. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/historia-ceramica>>. Acesso em 09 de Outubro de 2019.

ANSYS Help Viewer version 15.0. (2013)

ARAÚJO, M. V. **Estudo numérico do escoamento bifásico de água e óleo em conexões tê na presença de vazamento**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, 87f, 2014.

ARAÚJO, M. V.; SANTOS, R. S.; SILVA R. M. E.; LIMA, A. G. B. **Drying of industrial hollow ceramic brick: analysis of the moisture content and temperature parameters**. Defect and Diffusion Forum, v. 380, p. 72-78, Junho 2017.
10.4028/www.scientific.net/DDF.380.72

ARAÚJO, M. V.; SANTOS, R. S.; SILVA, R. M.; NASCIMENTO, J. B. S.; SANTOS, W. R. G.; LIMA, A. G. B. **Drying of industrial hollow ceramic brick: a numerical analysis using cfd**. Defect and Diffusion Forum, v. 391, p. 48-53, 2018.

ARAÚJO, M. V.; PEREIRA, A. S.; OLIVEIRA, J. L.; BRANDÃO, V. A. A.; BRASILEIRO FILHO, F. A.; SILVA, R. M.; LIMA, A. G. B. **Industrial ceramic brick drying in oven by cfd**. Materials, v. 12, n. 1612, p. 2-22, 2019.
doi:10.3390/ma12101612

ATEEQUE, MD.; UDA, YRAJ; MISHRA, R. K.; CHANDRAMOHAN, V. P.; TALUKDAR, P. **Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field**. International Journal of Thermal Sciences, v. 78, p. 145-157, Abril 2014.

AUGIER, F.; COUMANS, W. J.; HUGGET, A.; KAASSCHIETER, E. F. **On the risk of cracking in clay drying**. Chemical Engineering Journal, v. 86, n. 1-2, p. 133-138, 2002.

AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. **Mathematical modelling of the drying kinetics of hass avocado seeds**. *Industrial Crops and Products*, v. 91, p. 76–87, Novembro 2016.

BARATI, E.; ESFAHANI, J. A. **Mathematical modeling of convective drying: lumped temperature and spatially distributed moisture in slab**. *Energy*, v. 36, n. 4, p. 2294-2301, 2011.

BARBOSA, E. S. **Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: aplicação à indústria do petróleo**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 194f, 2011.

BASUNIA, M. A.; ABE, T. **Diffusion coefficients for predicting rough rice re-wetting behavior**. *Drying Technology*, v. 18, n. 4-5, p. 1099-1107, 2000.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J.J.S.; LIMA, A. G. B. de. **Secagem e queima de tijolos cerâmicos maciços e vazados incluindo variações dimensionais e danos estruturais**. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 3, n. 1, p. 46-61, 2008.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. **Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental**. *Revista Matéria*, v.14 n.4, p. 1088-1100, 2009.

BELHAMRI, A. **Characterization of the first falling rate period during drying of a porous material**. *Drying Technology: An International Journal*, v. 21, n. 7, p. 1235-1252, 2003.

BRANCO, P. M. Rochas. **Serviço Geológico do Brasil**, 2015. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Rochas-1107.html>>. Acesso em 08 de Outubro de 2019.

BRITO, M. K. T.; ALMEIDA, D. B. T.; LIMA, A. G. B.; ROCHA, L. A.; LIMA, E. S.; OLIVEIRA, V. A. B. **Heat and mass transfer during drying of clay ceramic materials: a three-dimensional analytical study**. *Diffusion Foundations*, v.10, p. 93-106, Junho 2016.

BOUKADIDA, N.; NASRALLAH, S. B. **Effect of the variability of heat and mass transfer coefficients on convective and convective–radiative drying of porous media**. *Drying Technology*, v. 20, n. 1, p. 67–91, 2002.

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

CARMO, J. E. F.; LIMA, A. G. B. **Drying of lentil including shrinkage: a numerical simulation**. *Drying Technology*, v. 23, n. 9-11, p. 1977-1992, 2005.

CARMO, J. E. F.; LIMA, A. G. B.; SILVA, C. J. **Continuous and intermittent drying (tempering) of oblate spheroidal bodies: modeling and simulation**. *International Journal of Food Engineering*, v. 8, n. 3, p. 1-15, 2012.

CAVALCANTI, W. S. **Compósitos poliéster/tecidos tramados vegetal-vidro: caracterização mecânica e simulação da sorção de água.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 122f, 2006.

ÇENGEL, Y. A. e GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa.** Porto Alegre: AMGH, 2012.

CHEN, D.; ZHENG, Y.; ZHU, X. **Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition.** Bioresource Technology, v. 107, p. 451–455, Março 2012.

CHEN, D.; LIU, X.; ZHU, X. **A one-step non-isothermal method for the determination of effective moisture diffusivity in powdered biomass.** Biomass and Bioenergy. v. 50, p. 81-86, Março 2013.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOGLU, O.; LIMA, A. G. B. **A diffusion based model for intermittent drying of rough rice.** Heat and Mass Transfer, v. 44, p. 905–911, 2008.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; NOGUEIRA, B. L. **Determinação do coeficiente de difusão líquida dos Grãos de feijão.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 8, n. 2, p. 117-126, 2006.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. **Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem.** Revista Ceres, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

CRUZ, F. J. G.; PALOMAR-CARNICERO, J. M.; CASANOVA-PELÁEZ, P. J.; CRUZ-PERAGÓN, F. **Experimental determination of effective moisture diffusivity during the drying of clean olive stone: Dependence of temperature, moisture content and sample thickness.** Fuel Processing Technology, v. 137, p. 320–326, Setembro 2015.

DEFRAEYE, T. **Advanced computational modelling for drying processes – A review.** Applied Energy, v. 131, n. 15, p. 323-344, 2014.

FARIAS, R. P.; PINHEIRO NETO, R.; SILVA, W. P.; LIMA, A. G. B. **A theoretical investigation of banana drying using diffusion model.** Defect and Diffusion Forum, v. 369, p. 142-147, Julho 2016.

FERREIRA, S. **Teste aponta qualidade ruim de tijolo.** Disponível em: <<http://www.sindicerpb.com.br/post/121035387227/pesquisar-teste-aponta-qualidade-ruim-de-tijolo>>. Acesso em 26 de Julho de 2015.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. In: MUJUMDAR, A. S. **Advances in drying.** Vol. 1. Washington: Editor Hemisphere Publishing Co., 1980, 301 p.

FOUST, S. A.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias.** Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A, 1982.

FRANCO, C. M. R.; LIMA, A. G. B. DE; SILVA, J. V.; NUNES, A. G. **Applying liquid diffusion model for continuous drying of rough rice in fixed bed.** Defect and Diffusion Forum, v. 369, p. 152-156, Julho 2016.

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C. B.; GONÇALVES, A. A. **Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v.44, n.1, p. 56-64, 2014.

GONG, Z. X.; DEVAHASTIN, S.; MUJUMDAR, A. S. **A two-dimensional finite element model for wheat drying in a novel rotating jet spouted bed.** Drying Technology, n. 15, n. 2, p. 575-592, 1997.

HACIHAFIZOGLU. O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K.; LIMA, A. G. B. **A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice.** European Food Research and Technology, v. 226, n.4, p. 787-793, 2008.

HAQ, R.; KUMAR, P.; PRASAD, K. **Effect of microwave treatment on dehydration kinetics and moisture diffusivity of Asiatic Himalayan black carrot.** Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2016.

ICEMEG, Equipamentos Metalúrgicos. **Fornos cerâmicos.** Disponível em: <<http://www.icemeg.com.br/fc.php>>. Acesso em: 15 de Janeiro de 2018.

INDUSTRIAL, M. **Materiais cerâmicos e seus usos.** Mecânica Industrial. Disponível em: < <https://www.mecanicaindustrial.com.br/materiais-ceramicos-e-seus-usos/>>. Acesso em: 11 de Dezembro de 2017.

ISLAM, MD; RAISUL, HO; MUJUMDAR, J. C. & A. S. **Simulation of liquid diffusion-controlled drying of shrinking thin slabs subjected to multiple heat sources.** Drying Technology, v. 21, n. 3, p. 413-438, 2003.

JIA, L. W.; ISLAM, MD R.; MUJUMDAR. A. S. **A simulation study on convection and microwave drying of different food products.** Drying Technology, v. 21, n. 8, p. 1549-1574, 2003.

KAWAGUTI, W. M. **Estudo do comportamento térmico de fornos intermitentes tipo “paulistinha” utilizados na indústria de cerâmica vermelha.** Dissertação (Mestrado). Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 87f, 2004.

KHALILI, K; BAGHERIAN, M.; KHISHEH, S. **Numerical simulation of drying ceramic using finite element and machine vision.** Procedia Technology, v. 12, p. 388-393, 2014.

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, Junho 2016.

KORONTHALYOVA, O.; BAGEL, L. **Moisture transport in salt free and salt contaminated ceramic bricks.** Energy Procedia, v. 78, n.1, p. 1401 – 1406, 2015.

KOUKOUCH, A.; IDLIMAM, A.; MOHAMED, A.; SARH, B.; IZRAR, B.; BOSTYN, S.; BAH, A.; ANSARI, O.; ZEGAOU, O.; AMINE, A. **Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste**. *Renewable Energy*, v. 101, p. 565 – 574, 2017.

LIMA, A. G. B.; QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. **Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration**. *Chemical Engineering Journal*, v. 86, n.1, p. 85–93, 2002.

MCLAUGHLIN, C. P.; MAGEE, T. R. A. **The effects of air temperature, sphere diameter and puffing with CO₂ on the drying of potato spheres**. *Drying Technology*, v. 17, n. 1-2, p. 119-136, 1999.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. Singapura: McGraw-Hill, 1993.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

NASCIMENTO, J. J. S.; NEVES, G. A.; BELO, F. A.; LIMA, A. G. B. **Simultaneous heat and moisture transfer and shrinkage during drying of ceramic materials**. *Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, (A), p. 501-509, 2004.

NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. **Experimental drying of ceramics bricks including shrinkage**. *Defect and Diffusion Forum*, v. 365, n. 10, p. 106-111, 2015

OUMMADI, S.; NAIT-ALI, B.; ALZINA, A.; VICTOR, J.; LAUNAY, Y.; MIRDRIKVAND, M.; DREHER, W.; REZWAN, K.; SMITH, D. S. **Distribution of water in ceramic green bodies during drying**. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 39, n. 10, p. 3164-3172, 2019.

PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S.; VIJAYA, G.; RAGHAVAN, V. G. S. **Spouted and spout-fluidized beds for gram drying**. *Drying Technology*, v. 7, n.4, p. 663-696, 1989.

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**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina., 153f, 2001.

PEREIRA, E. M. A.; SILVA, J. V.; ANDRADE, T. H. F.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. DE. **Simulating heat and mass transfer in drying process: applications in grains**. *Diffusion Foundations*, v. 3, p. 3-18, 2015.

RAHMAN, S. M. A.; ISLAM, M. R.; MUJUMDAR, A. S. **A study of coupled heat and mass transfer in composite food products during convective drying**. *Drying Technology*, v. 25, n. 7-8, p. 1359-1368, 2007.

RODRIGUEZ-RAMIREZ, J.; QUINTANA-HERNÁNDEZ, P. A.; MÉNDEZ-LAGUNAS, L.; MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, G.; GONZALEZ-ALATOIRE, G. **Diffusion of moisture in drying of sugar cane fibers and bundles**. *Drying Technology*, v. 18, n. 4-5, p. 1091-1098, 2000.

SANTOS, J. P. S.; SANTOS, I. B.; PEREIRA, E. M. A.; SILVA, J. V.; LIMA, A. G. B. **Wheat convective drying: an analytical investigation via galerkin-based integral method.** Defect and Diffusion Forum, v. 365, p. 82-87, Julho 2015.

SHOKOUHMAND, H.; ABDOLLAHI, V.; HOSSEINI, S.; VAHIDKHAH, K. **Performance optimization of a brick dryer using porous simulation approach.** Drying Technology: An International Journal, v. 29, n. 3, p. 360-370, 2011.

SILVA, C. M. D. P.; SILVA, W. P.; FARIAS, V. S. de O.; GOMES, J. P. **Effective diffusivity and convective mass transfer coefficient during the drying of bananas.** Engenharia Agrícola, v.32, n.2, p.342-353, 2012.

SILVA, J. B. **Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 173f, 2009.

SILVA, J. B.; ALMEIDA, G. S.; LIMA, W. C. P. B.; NEVES, G. A.; 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.; ALMEIDA, G. S.; NEVES, G. A.; LIMA, W. C. P. B.; FARIAS NETO, S. R.; 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, n. 7, p. 267-272, 2012.

SILVA, V. S. **Transferência de calor e massa em materiais com forma complexa via método da análise concentrada. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 197f, 2016.

SILVA, W. P.; MATA, M. E. R. M. C.; SILVA, C. D. P. S.; GUEDES, M. A.; LIMA, A. G. B. **Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*), variedade sempre-verde, com base no comportamento da secagem.** Engenharia Agrícola, v. 28, n. 2, p. 325-333, 2008.

SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; LIMA, A. G. B. **Drying kinetics of lima bean (*phaseolus lunatus l.*) Experimental determination and prediction by diffusion models.** International Journal of Food Engineering, v. 5, n. 3, Artigo 9, 2009.

SILVA, W. P.; FARIAS, V. S. O.; NEVES, G. A.; LIMA, A. G. B. **Modeling of water transport in roof tiles by removal of moisture at isothermal conditions.** Heat and Mass Transfer, v. 48, p. 809–821, 2012.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, L. D.; FARIAS, V. S. O. **Drying of clay slabs: experimental determination and prediction by two-dimensional diffusion models.** Ceramics International, v. 39, n. 7, p. 7911–7919, 2013.

TAVARES, F. V. S.; FARIAS NETO, S. R.; BARBOSA, E. S.; LIMA, A. G. B.; SILVA, C. J. B. **Drying of ceramic hollow bricks in an industrial tunnel dryer: a finite volume analysis.** The International Journal of Multiphysics, v. 8, n. 3, 297-312, 2014.

TOMAS, S.; SKANSI, D.; SOKELE, M. **Convection drying of porous material**. *Ceramics International*, v. 20, p. 9-16, 1994.

TZEMPELIKOS, D. A.; MITRAKOS, D.; VOUIROS, A. P.; BARDAKAS, A. V.; FILIOS, A. E.; MARGARIS, D. P. **Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices**. *Journal of Food Engineering*, v. 156, p. 10–21, Julho 2015.

VAN DER ZANDEN, A. J. J.; SCHOENMAKERS, A. M. E.; KERKHOF, P. J. A. M. **Isothermal vapour and liquid transport inside clay during drying**. *Drying Technology*, v. 14, n. 3-4, p. 647-676, 1996.

VAN DER ZANDEN, A. J. J.; WIT, M. H. DE. **A procedure to measure the diffusion coefficient of water in brick as a function of the water concentration**. *Drying Technology: An International Journal*, v. 30, n. 5, p. 526-534, 2012.

VELIC, D.; PLANINIC, M.; TOMAS, S.; BILIC, M. **Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying**. *Journal of Food Engineering*. v. 64, n. 1, p. 97-102, 2004.

VORHAUER, V.; TRETAU, A.; BÜCK, A.; PRAT, M. **Microwave drying of wet clay with intermittent Heating**. *Drying Technology*, v. 37, n. 5, p. 664-678, 2019.

WATANABE. Argila: Propriedades, características, comportamento e aplicações. Usos da argila. Disponível em: < <http://www.ebanataw.com.br/talude/argila.htm>>. Acesso em: 15 de Janeiro de 2018.

XING-JUN, L.; XIN, W.; YANG, L.; PING, J.; HUI, L. **Changes in moisture effective diffusivity and glass transition temperature of paddy during drying**. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 128, C, p. 112–119, 2016.

YOUNIS, M.; ABDELKARIM, D.; EL-ABDEIN. A. Z. **Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices**. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 25, n. 2, p. 332-338, 2018.

ZHU, Q.; LI, Y. **Effects of pore size distribution and fiber diameter on the coupled heat and liquid moisture transfer in porous textiles**. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 46, n. 26, p. 5099–5111, 2003.

ANEXOS

ANEXO A

Dados de temperatura e massa de água do tijolo usadas no teste de malha

Tabela A.1: Evolução temporal da temperatura no vértice do tijolo.

| t [min] | Temperatura [°C] | | | | |
|---------|------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Experimental | Malha A | Malha B | Malha C | Malha D |
| 0 | 26,1 | 26,1 | 26,1 | 26,1 | 26,1 |
| 10 | 42 | 37,0 | 37,0 | 37,0 | 37,0 |
| 20 | 44,3 | 44,8 | 44,8 | 44,8 | 44,8 |
| 30 | 45 | 51,4 | 51,4 | 51,4 | 51,4 |
| 40 | 49,2 | 57,2 | 57,2 | 57,2 | 57,2 |
| 50 | 54 | 62,3 | 62,3 | 62,3 | 62,3 |
| 60 | 57,2 | 66,8 | 66,8 | 66,8 | 66,8 |
| 70 | 60 | 70,7 | 70,7 | 70,7 | 70,7 |
| 80 | 63,8 | 74,2 | 74,2 | 74,2 | 74,2 |
| 90 | 65 | 77,2 | 77,2 | 77,2 | 77,2 |
| 100 | 67 | 79,9 | 79,9 | 79,9 | 79,9 |
| 110 | 69 | 82,3 | 82,3 | 82,3 | 82,3 |
| 120 | 69 | 84,4 | 84,4 | 84,4 | 84,4 |
| 130 | 69 | 86,2 | 86,2 | 86,2 | 86,2 |
| 140 | 69,9 | 87,9 | 87,9 | 87,9 | 87,9 |
| 150 | 70 | 89,3 | 89,3 | 89,3 | 89,3 |
| 160 | 70,1 | 90,6 | 90,6 | 90,6 | 90,6 |
| 170 | 72 | 91,7 | 91,7 | 91,7 | 91,7 |
| 180 | 73 | 92,7 | 92,7 | 92,7 | 92,7 |
| 190 | 74 | 93,5 | 93,5 | 93,5 | 93,5 |
| 200 | 75 | 94,3 | 94,3 | 94,3 | 94,3 |
| 230 | 76,7 | 96,1 | 96,1 | 96,1 | 96,1 |
| 260 | 84,3 | 97,3 | 97,3 | 97,3 | 97,3 |
| 290 | 87,3 | 98,2 | 98,2 | 98,2 | 98,2 |
| 320 | 89 | 98,8 | 98,7 | 98,7 | 98,7 |
| 350 | 90 | 99,1 | 99,1 | 99,1 | 99,1 |
| 380 | 91,3 | 99,4 | 99,4 | 99,4 | 99,4 |
| 440 | 92 | 99,7 | 99,7 | 99,7 | 99,7 |
| 500 | 92,1 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| 560 | 92,3 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| 620 | 92,8 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 680 | 92,7 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 740 | 93 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 800 | 93,1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 860 | 93,2 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Tabela A.2: Evolução temporal da massa de água média no interior do tijolo.

| Massa de água no interior do tijolo [g] | | | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| t [min] | Experimental | Malha A | Malha B | Malha C | Malha D |
| 0 | 440 | 440 | 440 | 440 | 440 |
| 10 | 412 | 381 | 345 | 324 | 315 |
| 20 | 381 | 330 | 282 | 264 | 259 |
| 30 | 353 | 287 | 236 | 223 | 221 |
| 40 | 322 | 250 | 201 | 191 | 190 |
| 50 | 291 | 218 | 172 | 165 | 164 |
| 60 | 262 | 191 | 149 | 143 | 142 |
| 70 | 231 | 168 | 129 | 124 | 123 |
| 80 | 205 | 147 | 112 | 108 | 107 |
| 90 | 179 | 130 | 98 | 94 | 93 |
| 100 | 160 | 114 | 86 | 82 | 81 |
| 110 | 136 | 101 | 75 | 71 | 71 |
| 120 | 124 | 89 | 66 | 62 | 62 |
| 130 | 112 | 79 | 58 | 55 | 54 |
| 140 | 99 | 70 | 51 | 48 | 47 |
| 150 | 88 | 62 | 45 | 42 | 42 |
| 160 | 78 | 55 | 39 | 37 | 37 |
| 170 | 69 | 49 | 35 | 33 | 32 |
| 180 | 62 | 44 | 31 | 29 | 28 |
| 190 | 56 | 39 | 27 | 25 | 25 |
| 200 | 53 | 35 | 24 | 22 | 22 |
| 230 | 43 | 25 | 17 | 16 | 15 |
| 260 | 32 | 18 | 12 | 11 | 11 |
| 290 | 23 | 13 | 9 | 8 | 8 |
| 320 | 18 | 10 | 6 | 6 | 6 |
| 350 | 15 | 7 | 5 | 4 | 4 |
| 380 | 11 | 6 | 4 | 3 | 3 |
| 440 | 7 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 500 | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 560 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 620 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 680 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 740 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 800 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 860 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

ANEXO B

Cálculos psicrométricos das condições iniciais e de contorno para cada condição de secagem.

B.1. Secagem a 50°C

a) Dados:

- Temperatura do ar: 50°C (Silva, 2009)
- Umidade relativa do ar: $U_{rel} = 20,8\%$ (Silva, 2009)
- Pressão de vapor saturado a 50°C: $P_{vapor}^{Sat} = 0,1235 \text{ bar}$ (Shapiro *et al.*, 2005)
- Massa específica do ar seco a 50°C: $\rho_f = 1,092 \text{ kg/m}^3$ (Shapiro *et al.*, 2005)

b) Cálculos para as condições de contorno:

- Pressão de vapor:

$$P_{vapor} = U_{rel} P_{vapor}^{sat} = 0,208 \times 0,1235 \text{ bar} = 0,0257 \text{ bar} \quad (\text{B.1})$$

- Razão de mistura (umidade absoluta):

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0,622 \frac{0,0257 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,0257 \text{ bar}} = 0,0162 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}} \quad (\text{B.2})$$

- Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa:

$$W_{ar\ seco} = U_{ar\ seco} A_{estufa} = 0,05 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ m}^2 = 0,0125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{B.3})$$

- Vazão mássica de ar seco:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_f W_{ar\ seco} = 1,092 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1,365 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{B.4})$$

$$\dot{m}_{ar\ seco} = 13,65 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{B.4})$$

- Vazão mássica de água:

$$\dot{m}_{água} = \omega \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0162 \times 13,65 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,22092 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{B.5})$$

c) Cálculos para as condições iniciais:

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_{ar\ seco} V_{estufa} = 1,092 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,149 \text{ m}^3 = 0,162 \text{ kg} \quad (\text{B.6})$$

$$m_{ar\ seco} = 162 \text{ g}$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{água} = \omega m_{ar\ seco} = 0,0162 \times 162 \text{ g} = 2,62601 \text{ g} \quad (\text{B.7})$$

B.2. Secagem a 60°C

a) Dados:

- Temperatura do ar: 60°C (Silva, 2009)
- Umidade relativa do ar: $U_{rel} = 13,58\%$ (Silva, 2009)
- Pressão de vapor saturado a 60°C: $P_{vapor}^{Sat} = 0,1994 \text{ bar}$ (Shapiro *et al.*, 2005)
- Massa específica do ar seco a 60°C: $\rho_f = 1,060 \text{ kg/m}^3$ (Shapiro *et al.*, 2005)

b) Cálculos para as condições de contorno:

- Pressão de vapor:

$$P_{vapor} = U_{rel} P_{vapor}^{Sat} = 0,1358 \times 0,1994 \text{ bar} = 0,0271 \text{ bar} \quad (\text{B.8})$$

- Razão de mistura (umidade absoluta):

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0,622 \frac{0,0271 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,0271 \text{ bar}} = 0,0171 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}} \quad (\text{B.9})$$

- Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa:

$$W_{ar\ seco} = U_{ar\ seco} A_{estufa} = 0,06 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ m}^2 = 0,0150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{B.10})$$

- Vazão mássica de ar seco:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_f W_{ar\ seco} = 1,060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0150 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1,589 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{B.11})$$

$$\dot{m}_{ar\ seco} = 15,89 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

- Vazão mássica de água:

$$\dot{m}_{\text{água}} = \omega \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0171 \times 15,89 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{B.12})$$

c) Cálculos para as condições iniciais:

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_f V_{ar\ seco} = 1,060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,149 \text{ m}^3 = 0,157 \text{ kg} \quad (\text{B.13})$$

$$m_{ar\ seco} = 157 \text{ g}$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{\text{água}} = \omega m_{ar\ seco} = 0,0171 \times 157 \text{ g} = 2,68886 \text{ g} \quad (\text{B.14})$$

B.3. Secagem a 70°C

a) Dados:

- Temperatura do ar: 70°C (Silva, 2009)
- Umidade relativa do ar: $U_{rel} = 7,68\%$ (Silva, 2009)
- Pressão de vapor saturado a 70°C: $P_{vapor}^{Sat} = 0,3119 \text{ bar}$ (Shapiro *et al.*, 2005)
- Massa específica do ar seco a 70°C: $\rho_f = 1,029 \text{ kg/m}^3$ (Shapiro *et al.*, 2005)

b) Cálculos para as condições de contorno:

- Pressão de vapor, P_{vapor} :

$$P_{vapor} = U_{rel} P_{vapor}^{sat} = 0,0768 \times 0,3119 \text{ bar} = 0,0240 \text{ bar} \quad (\text{B.15})$$

- Razão de mistura (umidade absoluta):

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0,622 \frac{0,0240 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,0240 \text{ bar}} = 0,0151 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}} \quad (\text{B.16})$$

- Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa:

$$W_{ar\ seco} = U_{ar\ seco} A_{estufa} = 0,07 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ m}^2 = 0,0175 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{B.17})$$

- Vazão mássica de ar seco:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_f W_{ar\ seco} = 1,029 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0175 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1,8 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{B.18})$$

$$\dot{m}_{ar\ seco} = 18 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

- Vazão mássica de água:

$$\dot{m}_{\text{água}} = \omega \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0151 \times 18 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,27112 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{B.19})$$

c) Cálculos para as condições iniciais:

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_f V_{ar\ seco} = 1,029 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,149 \text{ m}^3 = 0,153 \text{ kg} \quad (\text{B.20})$$

$$m_{ar\ seco} = 153 \text{ g}$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{\text{água}} = \omega m_{ar\ seco} = 0,0151 \times 153 \text{ g} = 2,30198 \text{ g} \quad (\text{B.21})$$

B.4. Secagem a 80°C

a) Dados:

- Temperatura do ar: 80°C (Silva, 2009)
- Umidade relativa do ar: $U_{rel} = 4,68\%$ (Silva, 2009)
- Pressão de vapor saturado a 80°C: $P_{vapor}^{sat} = 0,4739 \text{ bar}$ (Shapiro *et al.*, 2005)
- Massa específica do ar seco a 80°C: $\rho_f = 1,000 \text{ kg/m}^3$ (Shapiro *et al.*, 2005)

b) Cálculos para as condições de contorno:

- Pressão de vapor:

$$P_{vapor} = U_{rel} P_{vapor}^{sat} = 0,0468 \times 0,4739 \text{ bar} = 0,0222 \text{ bar} \quad (\text{B.22})$$

- Razão de mistura (umidade absoluta):

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0,622 \frac{0,4739 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,4739 \text{ bar}} = 0,0139 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}} \quad (\text{B.23})$$

- Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa:

$$W_{ar\ seco} = U_{ar\ seco} A_{estufa} = 0,08 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ m}^2 = 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{B.24})$$

- Vazão mássica de ar seco:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_f W_{ar\ seco} = 1,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1,999 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{ar\ seco} = 19,99 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{B.25})$$

- Vazão mássica de água:

$$\dot{m}_{água} = \omega \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0139 \times 19,99 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,27827 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{B.26})$$

c) Cálculos para as condições iniciais:

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_f V_{ar\ seco} = 1,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,149 \text{ m}^3 = 0,149 \text{ kg}$$

$$m_{ar\ seco} = 149 \text{ g} \quad (\text{B.27})$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{água} = \omega m_{ar\ seco} = 0,0139 \times 149 \text{ g} = 2,06730 \text{ g} \quad (\text{B.28})$$

B.5. Secagem a 90°C

a) Dados:

- Temperatura do ar: 90°C (Silva, 2009)
- Umidade relativa do ar: $U_{rel} = 3,3\%$ (Silva, 2009)
- Pressão de vapor saturado a 90°C: $P_{vapor}^{Sat} = 0,7014 \text{ bar}$ (Shapiro *et al.*, 2005)
- Massa específica do ar seco a 90°C: $\rho_f = 0,972 \text{ kg/m}^3$ (Shapiro *et al.*, 2005)

b) Cálculos para as condições de contorno:

- Pressão de vapor:

$$P_{vapor} = U_{rel} P_{vapor}^{sat} = 0,033 \times 0,7014 \text{ bar} = 0,0231 \text{ bar} \quad (\text{B.29})$$

- Razão de mistura (umidade absoluta):

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0,622 \frac{0,0231 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,0231 \text{ bar}} = 0,0145 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}} \quad (\text{B.30})$$

- Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa:

$$W_{ar\ seco} = U_{ar\ seco} A_{estufa} = 0,09 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ m}^2 = 0,0225 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{B.31})$$

- Vazão mássica de ar seco:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_f W_{ar\ seco} = 0,972 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0225 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2,187 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{B.32})$$

$$\dot{m}_{ar\ seco} = 21,87 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

- Vazão mássica de água:

$$\dot{m}_{água} = \omega \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0145 \times 21,87 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,31820 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{B.33})$$

c) Cálculos para as condições iniciais:

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_f V_{ar\ seco} = 0,972 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,149 \text{ m}^3 = 0,144 \text{ kg} \quad (\text{B.34})$$

$$m_{ar\ seco} = 144 \text{ g}$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{água} = \omega m_{ar\ seco} = 0,0145 \times 144 \text{ g} = 2,10014 \text{ g} \quad (\text{B.35})$$

B.6. Secagem a 100°C

a) Dados:

- Temperatura do ar: 100°C (Silva, 2009)
- Umidade relativa do ar: $U_{rel} = 1,8\%$ (Silva, 2009)
- Pressão de vapor saturado a 100°C: $P_{vapor}^{Sat} = 1,0140 \text{ bar}$ (Shapiro *et al.*, 2005)
- Massa específica do ar seco a 100°C: $\rho_f = 0,946 \text{ kg/m}^3$ (Shapiro *et al.*, 2005)

b) Cálculos para as condições de contorno:

- Pressão de vapor:

$$P_{vapor} = U_{rel} P_{vapor}^{sat} = 0,018 \times 1,0140 \text{ bar} = 0,0183 \text{ bar} \quad (\text{B.36})$$

- Razão de mistura (umidade absoluta):

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0,622 \frac{0,0183 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,0183 \text{ bar}} = 0,0114 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}} \quad (\text{B.37})$$

- Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa:

$$W_{ar\ seco} = U_{ar\ seco} A_{estufa} = 0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ m}^2 = 0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{B.38})$$

- Vazão mássica de ar seco:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_f W_{ar\ seco} = 0,946 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2,365 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{B.39})$$

$$\dot{m}_{ar\ seco} = 23,65 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

- Vazão mássica de água:

$$\dot{m}_{água} = \omega \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0114 \times 23,65 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,26984 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{B.40})$$

c) Cálculos para as condições iniciais:

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_f V_{ar\ seco} = 0,946 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,149 \text{ m}^3 = 0,141 \text{ kg} \quad (\text{B.41})$$

$$m_{ar\ seco} = 141 \text{ g}$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{água} = \omega m_{ar\ seco} = 0,0114 \times 141 \text{ g} = 1,60376 \text{ g} \quad (\text{B.42})$$

ANEXO C

Dados de temperatura e coeficiente de transferência de calor convectiva em função do tempo de secagem

Tabela C.1: Evolução temporal da temperatura no vértice do tijolo e do coeficiente de transferência de calor convectivo para secagem a 50°C.

| t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m².K)] | t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m².K)] |
|---------|--------------|----------|------------------------------|---------|--------------|----------|------------------------------|
| | Experimental | Numérico | | | Experimental | Numérico | |
| 0 | 20,6 | 20,6 | 0,0415 | 250 | 32,8 | 35,5 | 0,9655 |
| 10 | 25,2 | 22,4 | 0,9737 | 260 | 33,6 | 35,9 | 0,9653 |
| 20 | 28,5 | 23,6 | 0,9732 | 270 | 33,8 | 36,2 | 0,9650 |
| 30 | 28,5 | 24,6 | 0,9728 | 280 | 34,1 | 36,5 | 0,9648 |
| 40 | 28,8 | 25,5 | 0,9724 | 290 | 34,4 | 36,8 | 0,9645 |
| 50 | 29,1 | 26,2 | 0,9719 | 300 | 34,2 | 37,1 | 0,9643 |
| 60 | 29,1 | 26,9 | 0,9715 | 310 | 34,4 | 37,4 | 0,9641 |
| 70 | 29,6 | 27,6 | 0,9711 | 320 | 33,7 | 37,7 | 0,9639 |
| 80 | 29,6 | 28,2 | 0,9708 | 330 | 36,5 | 38,0 | 0,9637 |
| 90 | 29,2 | 28,8 | 0,9704 | 360 | 37,3 | 38,8 | 0,9631 |
| 100 | 29,7 | 29,3 | 0,9700 | 390 | 38,4 | 39,5 | 0,9625 |
| 110 | 30,7 | 29,9 | 0,9697 | 420 | 39,4 | 40,2 | 0,9620 |
| 120 | 29,8 | 30,3 | 0,9693 | 450 | 39 | 40,9 | 0,9615 |
| 130 | 29,7 | 30,8 | 0,9690 | 480 | 39,1 | 41,5 | 0,9611 |
| 140 | 29,8 | 31,3 | 0,9686 | 510 | 40,3 | 42,0 | 0,9607 |
| 140 | 30,9 | 31,7 | 0,9683 | 540 | 40,8 | 42,6 | 0,9603 |
| 160 | 31,3 | 32,2 | 0,9680 | 570 | 40,3 | 43,0 | 0,9599 |
| 170 | 31,5 | 32,6 | 0,9677 | 630 | 41,2 | 43,9 | 0,9593 |
| 180 | 30,8 | 33,0 | 0,9674 | 690 | 40,4 | 44,7 | 0,9587 |
| 190 | 30,9 | 33,4 | 0,9671 | 750 | 40,5 | 45,4 | 0,9582 |
| 200 | 30,6 | 33,8 | 0,9668 | 810 | 40,9 | 46,0 | 0,9578 |
| 210 | 31,7 | 34,1 | 0,9665 | 870 | 40,9 | 46,5 | 0,9574 |
| 220 | 31,1 | 34,5 | 0,9663 | 930 | 41,8 | 47,0 | 0,9570 |
| 230 | 32,6 | 34,9 | 0,9660 | 990 | 41,2 | 47,3 | 0,9568 |
| 240 | 32,3 | 35,2 | 0,9658 | - | - | - | - |

Tabela C.2: Evolução temporal da temperatura no vértice do tijolo e do coeficiente de transferência de calor convectivo para secagem a 60°C.

| t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m ² .K)] | t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m ² .K)] |
|---------|--------------|----------|---|---------|--------------|----------|---|
| | Experimental | Numérico | | | Experimental | Numérico | |
| 0 | 20,5 | 20,50 | 0,040 | 220 | 37,8 | 40,57 | 1,070 |
| 10 | 25,7 | 23,26 | 1,082 | 230 | 38,7 | 41,06 | 1,070 |
| 20 | 27,7 | 24,99 | 1,081 | 240 | 39,5 | 41,54 | 1,069 |
| 30 | 28,6 | 26,45 | 1,080 | 250 | 40,5 | 42,00 | 1,069 |
| 40 | 29,8 | 27,71 | 1,079 | 260 | 40,9 | 42,45 | 1,068 |
| 50 | 30,9 | 28,85 | 1,079 | 270 | 41,7 | 42,89 | 1,068 |
| 60 | 29,2 | 29,87 | 1,078 | 280 | 42,2 | 43,31 | 1,068 |
| 70 | 31,7 | 30,82 | 1,078 | 290 | 42,6 | 43,73 | 1,067 |
| 80 | 31,3 | 31,70 | 1,077 | 300 | 43,4 | 44,14 | 1,067 |
| 90 | 32 | 32,53 | 1,076 | 310 | 43,6 | 44,53 | 1,067 |
| 100 | 31,3 | 33,31 | 1,076 | 340 | 46,3 | 45,65 | 1,066 |
| 110 | 32,5 | 34,05 | 1,075 | 370 | 46,3 | 46,70 | 1,065 |
| 120 | 32,7 | 34,76 | 1,075 | 400 | 47,6 | 47,66 | 1,064 |
| 130 | 33,2 | 35,43 | 1,074 | 430 | 48,2 | 48,55 | 1,064 |
| 140 | 34 | 36,08 | 1,074 | 460 | 49 | 49,38 | 1,063 |
| 150 | 35,3 | 36,71 | 1,073 | 490 | 49 | 50,15 | 1,062 |
| 160 | 35,2 | 37,32 | 1,073 | 520 | 49,4 | 50,86 | 1,062 |
| 170 | 35,2 | 37,90 | 1,072 | 580 | 49,8 | 52,14 | 1,061 |
| 180 | 36,3 | 38,47 | 1,072 | 640 | 50,3 | 53,23 | 1,060 |
| 190 | 36,5 | 39,02 | 1,071 | 700 | 50,1 | 54,18 | 1,059 |
| 200 | 37,5 | 39,55 | 1,071 | 760 | 50,2 | 54,99 | 1,058 |
| 210 | 37,3 | 40,07 | 1,070 | 820 | 50,2 | 55,68 | 1,058 |

Tabela C.3: Evolução temporal da temperatura no vértice do tijolo e do coeficiente de transferência de calor convectivo para secagem a 70°C

| t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m ² .K)] | t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m ² .K)] |
|---------|--------------|----------|---|---------|--------------|----------|---|
| | Experimental | Numérico | | | Experimental | Numérico | |
| 0 | 26,0 | 26,0 | 0,039 | 210 | 52,1 | 49,1 | 1,161 |
| 10 | 36,5 | 29,4 | 1,175 | 220 | 52,2 | 49,6 | 1,160 |
| 20 | 38,2 | 31,5 | 1,174 | 230 | 53,2 | 50,2 | 1,160 |
| 30 | 36,9 | 33,2 | 1,173 | 240 | 53,8 | 50,7 | 1,160 |
| 40 | 37,0 | 34,7 | 1,172 | 250 | 54,8 | 51,2 | 1,159 |
| 50 | 38,6 | 36,0 | 1,171 | 260 | 55,3 | 51,7 | 1,159 |
| 60 | 39,0 | 37,3 | 1,170 | 290 | 59,7 | 53,2 | 1,157 |
| 70 | 41,0 | 38,4 | 1,170 | 320 | 60,6 | 54,5 | 1,156 |
| 80 | 39,0 | 39,4 | 1,169 | 350 | 61,5 | 55,7 | 1,155 |
| 90 | 40,3 | 40,4 | 1,168 | 380 | 62,3 | 56,8 | 1,154 |
| 100 | 41,2 | 41,3 | 1,168 | 410 | 63,0 | 57,9 | 1,153 |
| 110 | 41,7 | 42,1 | 1,167 | 440 | 62,3 | 58,8 | 1,153 |
| 120 | 41,3 | 43,0 | 1,166 | 470 | 62,5 | 59,7 | 1,152 |
| 130 | 43,0 | 43,7 | 1,166 | 530 | 62,9 | 61,2 | 1,150 |
| 140 | 42,5 | 44,5 | 1,165 | 590 | 64,1 | 62,5 | 1,149 |
| 150 | 42,5 | 45,2 | 1,164 | 650 | 63,3 | 63,6 | 1,149 |
| 160 | 46,2 | 45,9 | 1,164 | 710 | 64,1 | 64,6 | 1,150 |
| 170 | 46,9 | 46,6 | 1,163 | 770 | 64,7 | 65,4 | 1,147 |
| 180 | 47,7 | 47,2 | 1,162 | 830 | 64,7 | 66,1 | 1,146 |
| 190 | 48,2 | 47,9 | 1,162 | 890 | 63,8 | 66,7 | 1,146 |
| 200 | 50,1 | 48,5 | 1,162 | 950 | 63,6 | 67,2 | 1,146 |

Tabela C.4: Evolução temporal da temperatura no vértice do tijolo e do coeficiente de transferência de calor convectivo para secagem a 80°C.

| t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m².K)] | t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m².K)] |
|---------|--------------|----------|------------------------------|------------|--------------|----------|------------------------------|
| | Experimental | Numérico | | | Experimental | Numérico | |
| 0 | 21,4 | 21,4 | 1,267 | 210 | 57,7 | 53,6 | 1,246 |
| 10 | 33,6 | 26,2 | 1,266 | 220 | 58,8 | 54,3 | 1,245 |
| 20 | 34,8 | 29,2 | 1,264 | 230 | 59,3 | 55,1 | 1,245 |
| 30 | 37,2 | 31,7 | 1,263 | 240 | 61,8 | 55,8 | 1,244 |
| 40 | 37,1 | 33,8 | 1,262 | 250 | 59,7 | 56,5 | 1,243 |
| 50 | 36,5 | 35,7 | 1,261 | 260 | 62,7 | 57,2 | 1,243 |
| 60 | 39,1 | 37,4 | 1,259 | 270 | 62,2 | 57,8 | 1,241 |
| 70 | 40,1 | 38,9 | 1,258 | 300 | 67,6 | 59,7 | 1,240 |
| 80 | 43,3 | 40,4 | 1,257 | 330 | 68,3 | 61,4 | 1,238 |
| 90 | 42,8 | 41,7 | 1,256 | 360 | 67,6 | 62,9 | 1,237 |
| 100 | 44,1 | 43,0 | 1,255 | 390 | 68,7 | 64,4 | 1,236 |
| 110 | 45,7 | 44,2 | 1,254 | 420 | 67,1 | 65,6 | 1,235 |
| 120 | 47,2 | 45,3 | 1,253 | 450 | 68,3 | 66,8 | 1,234 |
| 130 | 49,2 | 46,4 | 1,252 | 480 | 68,9 | 67,9 | 1,232 |
| 140 | 50,3 | 47,4 | 1,251 | 540 | 69,7 | 69,8 | 1,231 |
| 150 | 51,1 | 48,4 | 1,251 | 600 | 70,3 | 71,5 | 1,229 |
| 160 | 51,6 | 49,3 | 1,250 | 660 | 69,7 | 72,8 | 1,228 |
| 170 | 52,2 | 50,2 | 1,249 | 720 | 69,7 | 73,9 | 1,227 |
| 180 | 53,1 | 51,1 | 1,248 | 780 | 69 | 74,9 | 1,227 |
| 190 | 54,2 | 52,0 | 1,247 | 840 | 69,1 | 75,7 | 1,226 |
| 200 | 55,5 | 52,8 | 1,247 | 900 | 69,2 | 76,4 | 1,246 |

Tabela C.5: Evolução temporal da temperatura no vértice do tijolo e do coeficiente de transferência de calor convectivo para secagem a 90°C.

| t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m ² .K)] | t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m ² .K)] |
|---------|--------------|----------|---|---------|--------------|----------|---|
| | Experimental | Numérico | | | Experimental | Numérico | |
| 0 | 21,0 | 21,0 | 0,037 | 180 | 60,5 | 57,4 | 1,326 |
| 10 | 34,8 | 27,1 | 1,349 | 190 | 61,8 | 58,5 | 1,325 |
| 20 | 36,0 | 30,8 | 1,347 | 200 | 64,7 | 59,4 | 1,324 |
| 30 | 38,5 | 33,8 | 1,346 | 210 | 66,2 | 60,4 | 1,323 |
| 40 | 40,0 | 36,5 | 1,344 | 220 | 67,2 | 61,3 | 1,322 |
| 50 | 41,1 | 38,8 | 1,342 | 230 | 66,1 | 62,2 | 1,321 |
| 60 | 43,0 | 40,9 | 1,341 | 240 | 66,8 | 63,0 | 1,321 |
| 70 | 44,0 | 42,8 | 1,339 | 270 | 73,3 | 65,4 | 1,320 |
| 80 | 45,5 | 44,5 | 1,338 | 300 | 75,1 | 67,6 | 1,319 |
| 90 | 47,2 | 46,1 | 1,336 | 330 | 77,0 | 69,5 | 1,318 |
| 100 | 48,3 | 47,7 | 1,335 | 360 | 76,6 | 71,3 | 1,316 |
| 110 | 52,8 | 49,1 | 1,334 | 390 | 76,9 | 73,0 | 1,314 |
| 120 | 53,4 | 50,5 | 1,332 | 450 | 77,1 | 75,8 | 1,313 |
| 130 | 57,0 | 51,7 | 1,331 | 510 | 78,9 | 78,2 | 1,311 |
| 140 | 58,1 | 53,0 | 1,330 | 570 | 78,5 | 80,2 | 1,308 |
| 150 | 59,1 | 54,2 | 1,329 | 630 | 78,5 | 81,8 | 1,306 |
| 160 | 61,0 | 55,3 | 1,328 | 690 | 77,5 | 83,2 | 1,302 |
| 170 | 62,2 | 56,4 | 1,327 | - | - | - | - |

Tabela C.6: Evolução temporal da temperatura no vértice do tijolo e do coeficiente de transferência de calor convectivo para secagem a 100°C.

| t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m ² .K)] | t [min] | T [°C] | | hc Numérico [W/(m ² .K)] |
|---------|--------------|----------|---|---------|--------------|----------|---|
| | Experimental | Numérico | | | Experimental | Numérico | |
| 0 | 26,1 | 26,1 | 0,036 | 180 | 73,0 | 66,5 | 1,394 |
| 10 | 42,0 | 33,0 | 1,420 | 190 | 74,0 | 67,5 | 1,393 |
| 20 | 44,3 | 37,1 | 1,418 | 200 | 75,0 | 68,6 | 1,392 |
| 30 | 45,0 | 40,5 | 1,416 | 230 | 76,7 | 71,5 | 1,389 |
| 40 | 49,2 | 43,5 | 1,414 | 260 | 84,3 | 74,2 | 1,386 |
| 50 | 54,0 | 46,0 | 1,412 | 290 | 87,3 | 76,6 | 1,384 |
| 60 | 57,2 | 48,3 | 1,410 | 320 | 89,0 | 78,7 | 1,382 |
| 70 | 60,0 | 50,4 | 1,409 | 350 | 90,0 | 80,7 | 1,380 |
| 80 | 63,8 | 52,4 | 1,407 | 380 | 91,3 | 82,4 | 1,378 |
| 90 | 65,0 | 54,1 | 1,406 | 440 | 92,0 | 85,5 | 1,375 |
| 100 | 67,0 | 55,8 | 1,404 | 500 | 92,1 | 88,0 | 1,373 |
| 110 | 69,0 | 57,4 | 1,403 | 560 | 92,3 | 90,1 | 1,371 |
| 120 | 69,0 | 58,9 | 1,401 | 620 | 92,8 | 91,8 | 1,369 |
| 130 | 69,0 | 60,3 | 1,400 | 680 | 92,7 | 93,3 | 1,368 |
| 140 | 69,9 | 61,6 | 1,399 | 740 | 93,0 | 94,4 | 1,367 |
| 150 | 70,0 | 62,9 | 1,397 | 800 | 93,1 | 95,4 | 1,366 |
| 160 | 70,1 | 64,1 | 1,396 | 860 | 93,2 | 96,2 | 1,365 |
| 170 | 72,0 | 65,3 | 1,395 | - | - | - | - |

ANEXO D

Dados da massa de água em função do tempo de secagem.

Tabela D.1: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 50°C.

| t [min] | Massa de água [g] | | t [min] | Massa de água [g] | |
|---------|-------------------|----------|---------|-------------------|----------|
| | Experimental | Numérico | | Experimental | Numérico |
| 0 | 365 | 365 | 250 | 118 | 116 |
| 10 | 354 | 345 | 260 | 111 | 111 |
| 20 | 342 | 327 | 270 | 105 | 106 |
| 30 | 331 | 311 | 280 | 99 | 102 |
| 40 | 322 | 296 | 290 | 95 | 98 |
| 50 | 309 | 281 | 300 | 89 | 94 |
| 60 | 294 | 268 | 310 | 86 | 90 |
| 70 | 285 | 256 | 320 | 81 | 86 |
| 80 | 273 | 244 | 330 | 68 | 83 |
| 90 | 261 | 233 | 360 | 57 | 73 |
| 100 | 251 | 222 | 390 | 48 | 65 |
| 110 | 239 | 213 | 420 | 38 | 57 |
| 120 | 228 | 203 | 450 | 36 | 50 |
| 130 | 217 | 194 | 480 | 31 | 45 |
| 140 | 209 | 186 | 510 | 27 | 39 |
| 140 | 198 | 178 | 540 | 24 | 35 |
| 160 | 190 | 170 | 570 | 20 | 31 |
| 170 | 181 | 163 | 630 | 16 | 24 |
| 180 | 181 | 156 | 690 | 13 | 19 |
| 190 | 161 | 149 | 750 | 11 | 15 |
| 200 | 153 | 143 | 810 | 7 | 12 |
| 210 | 146 | 137 | 870 | 7 | 9 |
| 220 | 139 | 131 | 930 | 6 | 7 |
| 230 | 130 | 126 | 990 | 5 | 6 |
| 240 | 123 | 121 | - | - | - |

Tabela D.2: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 60°C.

| t [min] | Massa de água [g] | | t [min] | Massa de água [g] | |
|---------|-------------------|----------|---------|-------------------|----------|
| | Experimental | Numérico | | Experimental | Numérico |
| 0 | 386 | 386 | 220 | 106 | 115 |
| 10 | 373 | 362 | 230 | 99 | 109 |
| 20 | 358 | 342 | 240 | 93 | 104 |
| 30 | 342 | 322 | 250 | 87 | 98 |
| 40 | 326 | 305 | 260 | 81 | 93 |
| 50 | 312 | 288 | 270 | 77 | 89 |
| 60 | 297 | 272 | 280 | 71 | 84 |
| 70 | 282 | 258 | 290 | 67 | 80 |
| 80 | 269 | 244 | 300 | 63 | 76 |
| 90 | 254 | 231 | 310 | 60 | 72 |
| 100 | 239 | 219 | 340 | 50 | 61 |
| 110 | 223 | 207 | 370 | 42 | 52 |
| 120 | 211 | 196 | 400 | 35 | 45 |
| 130 | 197 | 186 | 430 | 31 | 38 |
| 140 | 183 | 176 | 460 | 25 | 33 |
| 150 | 168 | 167 | 490 | 22 | 28 |
| 160 | 159 | 158 | 520 | 20 | 24 |
| 170 | 149 | 150 | 580 | 15 | 18 |
| 180 | 138 | 142 | 640 | 12 | 13 |
| 190 | 129 | 135 | 700 | 9 | 10 |
| 200 | 122 | 128 | 760 | 7 | 7 |
| 210 | 114 | 122 | 820 | 7 | 5 |

Tabela D.3: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 70°C.

| t [min] | Massa de água [g] | | t [min] | Massa de água [g] | |
|---------|-------------------|----------|---------|-------------------|----------|
| | Experimental | Numérico | | Experimental | Numérico |
| 0 | 408 | 408 | 210 | 90 | 107 |
| 10 | 391 | 381 | 220 | 85 | 100 |
| 20 | 369 | 357 | 230 | 78 | 94 |
| 30 | 348 | 334 | 240 | 71 | 88 |
| 40 | 327 | 314 | 250 | 67 | 83 |
| 50 | 307 | 294 | 260 | 63 | 78 |
| 60 | 286 | 276 | 290 | 50 | 65 |
| 70 | 263 | 259 | 320 | 40 | 54 |
| 80 | 247 | 243 | 350 | 32 | 44 |
| 90 | 233 | 228 | 380 | 27 | 37 |
| 100 | 218 | 214 | 410 | 23 | 31 |
| 110 | 200 | 201 | 440 | 19 | 25 |
| 120 | 188 | 188 | 470 | 18 | 21 |
| 130 | 173 | 177 | 530 | 12 | 15 |
| 140 | 160 | 166 | 590 | 9 | 10 |
| 150 | 148 | 156 | 650 | 8 | 7 |
| 160 | 136 | 146 | 710 | 6 | 5 |
| 170 | 123 | 137 | 770 | 5 | 3 |
| 180 | 114 | 129 | 830 | 4 | 2 |
| 190 | 106 | 121 | 890 | 3 | 2 |
| 200 | 97 | 114 | 950 | 3 | 1 |

Tabela D.4: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 80°C.

| t [min] | Massa de água [g] | | t [min] | Massa de água [g] | |
|---------|-------------------|----------|---------|-------------------|----------|
| | Experimental | Numérico | | Experimental | Numérico |
| 0 | 394 | 394 | 210 | 59 | 87 |
| 10 | 377 | 366 | 220 | 54 | 81 |
| 20 | 354 | 340 | 230 | 48 | 76 |
| 30 | 329 | 316 | 240 | 44 | 70 |
| 40 | 303 | 294 | 250 | 41 | 66 |
| 50 | 278 | 274 | 260 | 37 | 61 |
| 60 | 255 | 255 | 270 | 34 | 57 |
| 70 | 230 | 237 | 300 | 26 | 46 |
| 80 | 194 | 221 | 330 | 22 | 37 |
| 90 | 183 | 205 | 360 | 17 | 30 |
| 100 | 167 | 191 | 390 | 14 | 25 |
| 110 | 150 | 178 | 420 | 10 | 20 |
| 120 | 136 | 166 | 450 | 10 | 16 |
| 130 | 122 | 154 | 480 | 8 | 13 |
| 140 | 109 | 143 | 540 | 6 | 9 |
| 150 | 100 | 134 | 600 | 4 | 6 |
| 160 | 91 | 124 | 660 | 2 | 4 |
| 170 | 84 | 116 | 720 | 2 | 3 |
| 180 | 76 | 108 | 780 | 1 | 2 |
| 190 | 70 | 100 | 840 | 1 | 1 |
| 200 | 65 | 94 | 900 | 1 | 1 |

Tabela D.5: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 90°C.

| t [min] | Massa de água [g] | | t [min] | Massa de água [g] | |
|---------|-------------------|----------|---------|-------------------|----------|
| | Experimental | Numérico | | Experimental | Numérico |
| 0 | 420 | 420 | 180 | 71 | 102 |
| 10 | 396 | 387 | 190 | 65 | 94 |
| 20 | 370 | 358 | 200 | 59 | 87 |
| 30 | 343 | 330 | 210 | 54 | 80 |
| 40 | 315 | 305 | 220 | 49 | 74 |
| 50 | 288 | 282 | 230 | 46 | 69 |
| 60 | 260 | 260 | 240 | 42 | 64 |
| 70 | 232 | 241 | 270 | 32 | 51 |
| 80 | 203 | 222 | 300 | 24 | 40 |
| 90 | 181 | 205 | 330 | 20 | 32 |
| 100 | 165 | 190 | 360 | 16 | 25 |
| 110 | 146 | 176 | 390 | 15 | 20 |
| 120 | 132 | 162 | 450 | 9 | 13 |
| 130 | 116 | 150 | 510 | 7 | 8 |
| 140 | 104 | 139 | 570 | 5 | 5 |
| 150 | 95 | 128 | 630 | 4 | 3 |
| 160 | 85 | 119 | 690 | 4 | 2 |
| 170 | 76 | 110 | - | - | - |

Tabela D.6: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 100°C.

| t [min] | Massa de água [g] | | t [min] | Massa de água [g] | |
|---------|-------------------|----------|---------|-------------------|----------|
| | Experimental | Numérico | | Experimental | Numérico |
| 0 | 440 | 440 | 180 | 62 | 96 |
| 10 | 412 | 403 | 190 | 56 | 88 |
| 20 | 381 | 370 | 200 | 53 | 81 |
| 30 | 353 | 340 | 230 | 43 | 63 |
| 40 | 322 | 312 | 260 | 32 | 49 |
| 50 | 291 | 286 | 290 | 23 | 38 |
| 60 | 262 | 263 | 320 | 18 | 30 |
| 70 | 231 | 242 | 350 | 15 | 23 |
| 80 | 205 | 222 | 380 | 11 | 18 |
| 90 | 179 | 204 | 440 | 7 | 11 |
| 100 | 160 | 187 | 500 | 5 | 7 |
| 110 | 136 | 172 | 560 | 4 | 4 |
| 120 | 124 | 158 | 620 | 4 | 3 |
| 130 | 112 | 145 | 680 | 2 | 2 |
| 140 | 99 | 134 | 740 | 1 | 1 |
| 150 | 88 | 123 | 800 | 1 | 1 |
| 160 | 78 | 113 | 860 | 1 | 1 |
| 170 | 69 | 104 | - | - | - |

ANEXO E

Gradientes de massa de água e coeficiente de transferência de massa convectiva em função do tempo de secagem.

Tabela E.1: Massa de água, gradientes de massa de água na superfície do tijolo e coeficientes de transferência de massa convectivo para secagem a 50°C ($m_{\text{água}_{eq}} = 3,405$ g, $m_{\text{tijolo}_{seco}} = 2613$ g).

| t [min] | $\partial m/\partial x$ [g/m] | $\partial m/\partial y$ [g/m] | $\partial m/\partial z$ [g/m] | $\partial m/\partial t$ [g/m] | $m_{\text{água}}$ [g] | $h_{m,x}$ [m/s] | $h_{m,y}$ [m/s] | $h_{m,z}$ [m/s] | h_m [m/s] |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 10 | -235 | 2,27 | 1,36 | 2585 | 192 | 3,39E-05 | -3,28E-07 | -1,97E-07 | -3,73E-04 |
| 20 | -220 | 2,10 | 1,25 | 2472 | 183 | 3,35E-05 | -3,19E-07 | -1,89E-07 | -3,75E-04 |
| 30 | -208 | 1,96 | 1,11 | 2367 | 174 | 3,32E-05 | -3,12E-07 | -1,77E-07 | -3,78E-04 |
| 40 | -197 | 1,83 | 0,95 | 2268 | 166 | 3,31E-05 | -3,07E-07 | -1,59E-07 | -3,80E-04 |
| 50 | -188 | 1,72 | 0,78 | 2174 | 159 | 3,30E-05 | -3,03E-07 | -1,38E-07 | -3,82E-04 |
| 60 | -179 | 1,63 | 0,61 | 2085 | 152 | 3,29E-05 | -3,00E-07 | -1,13E-07 | -3,84E-04 |
| 70 | -170 | 1,54 | 0,44 | 2000 | 145 | 3,29E-05 | -2,97E-07 | -8,41E-08 | -3,86E-04 |
| 80 | -163 | 1,46 | 0,26 | 1919 | 138 | 3,29E-05 | -2,94E-07 | -5,29E-08 | -3,88E-04 |
| 90 | -155 | 1,38 | 0,09 | 1841 | 132 | 3,29E-05 | -2,93E-07 | -1,95E-08 | -3,90E-04 |
| 100 | -148 | 1,31 | -0,07 | 1766 | 126 | 3,29E-05 | -2,91E-07 | 1,57E-08 | -3,92E-04 |
| 110 | -142 | 1,25 | -0,23 | 1694 | 121 | 3,29E-05 | -2,90E-07 | 5,23E-08 | -3,93E-04 |
| 120 | -136 | 1,19 | -0,37 | 1626 | 116 | 3,29E-05 | -2,89E-07 | 8,98E-08 | -3,95E-04 |
| 130 | -130 | 1,13 | -0,50 | 1560 | 111 | 3,30E-05 | -2,88E-07 | 1,28E-07 | -3,97E-04 |
| 140 | -124 | 1,08 | -0,63 | 1496 | 106 | 3,30E-05 | -2,87E-07 | 1,66E-07 | -3,98E-04 |
| 150 | -119 | 1,03 | -0,74 | 1436 | 101 | 3,30E-05 | -2,87E-07 | 2,05E-07 | -3,99E-04 |
| 160 | -114 | 0,98 | -0,83 | 1377 | 97 | 3,31E-05 | -2,86E-07 | 2,43E-07 | -4,01E-04 |
| 170 | -109 | 0,94 | -0,92 | 1322 | 93 | 3,31E-05 | -2,86E-07 | 2,81E-07 | -4,02E-04 |
| 180 | -104 | 0,90 | -1,00 | 1268 | 89 | 3,32E-05 | -2,86E-07 | 3,18E-07 | -4,03E-04 |
| 190 | -100 | 0,86 | -1,07 | 1217 | 85 | 3,33E-05 | -2,86E-07 | 3,55E-07 | -4,05E-04 |
| 200 | -96 | 0,82 | -1,13 | 1167 | 82 | 3,33E-05 | -2,86E-07 | 3,91E-07 | -4,06E-04 |
| 210 | -92 | 0,79 | -1,17 | 1120 | 78 | 3,34E-05 | -2,86E-07 | 4,27E-07 | -4,07E-04 |
| 220 | -88 | 0,75 | -1,21 | 1075 | 75 | 3,34E-05 | -2,86E-07 | 4,62E-07 | -4,08E-04 |
| 230 | -84 | 0,72 | -1,25 | 1031 | 72 | 3,35E-05 | -2,87E-07 | 4,95E-07 | -4,10E-04 |
| 240 | -81 | 0,69 | -1,27 | 989 | 69 | 3,36E-05 | -2,87E-07 | 5,28E-07 | -4,11E-04 |
| 250 | -78 | 0,66 | -1,29 | 949 | 66 | 3,37E-05 | -2,88E-07 | 5,60E-07 | -4,12E-04 |
| 260 | -74 | 0,64 | -1,30 | 911 | 64 | 3,37E-05 | -2,88E-07 | 5,91E-07 | -4,13E-04 |
| 270 | -71 | 0,61 | -1,31 | 874 | 61 | 3,38E-05 | -2,89E-07 | 6,22E-07 | -4,14E-04 |
| 280 | -68 | 0,58 | -1,31 | 839 | 58 | 3,39E-05 | -2,89E-07 | 6,51E-07 | -4,16E-04 |
| 290 | -66 | 0,56 | -1,31 | 805 | 56 | 3,40E-05 | -2,90E-07 | 6,79E-07 | -4,17E-04 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|------|-------|-----|----|----------|-----------|----------|-----------|
| 300 | -63 | 0,54 | -1,30 | 772 | 54 | 3,41E-05 | -2,91E-07 | 7,07E-07 | -4,18E-04 |
| 310 | -60 | 0,51 | -1,30 | 741 | 52 | 3,42E-05 | -2,92E-07 | 7,34E-07 | -4,20E-04 |
| 320 | -58 | 0,49 | -1,28 | 711 | 49 | 3,43E-05 | -2,92E-07 | 7,60E-07 | -4,21E-04 |
| 330 | -56 | 0,47 | -1,27 | 682 | 47 | 3,44E-05 | -2,93E-07 | 7,85E-07 | -4,22E-04 |
| 360 | -49 | 0,42 | -1,21 | 603 | 42 | 3,47E-05 | -2,96E-07 | 8,56E-07 | -4,27E-04 |
| 390 | -43 | 0,37 | -1,14 | 533 | 37 | 3,51E-05 | -3,00E-07 | 9,21E-07 | -4,32E-04 |
| 420 | -38 | 0,33 | -1,06 | 471 | 33 | 3,56E-05 | -3,04E-07 | 9,82E-07 | -4,38E-04 |
| 450 | -34 | 0,29 | -0,98 | 417 | 29 | 3,61E-05 | -3,09E-07 | 1,04E-06 | -4,44E-04 |
| 480 | -30 | 0,26 | -0,89 | 368 | 26 | 3,67E-05 | -3,14E-07 | 1,09E-06 | -4,52E-04 |
| 510 | -26 | 0,23 | -0,81 | 326 | 23 | 3,74E-05 | -3,20E-07 | 1,15E-06 | -4,60E-04 |
| 540 | -23 | 0,20 | -0,74 | 288 | 20 | 3,83E-05 | -3,28E-07 | 1,20E-06 | -4,71E-04 |
| 570 | -21 | 0,18 | -0,67 | 255 | 18 | 3,92E-05 | -3,36E-07 | 1,26E-06 | -4,83E-04 |
| 630 | -16 | 0,14 | -0,54 | 200 | 14 | 4,18E-05 | -3,59E-07 | 1,39E-06 | -5,14E-04 |
| 690 | -13 | 0,11 | -0,43 | 156 | 11 | 4,56E-05 | -3,92E-07 | 1,55E-06 | -5,61E-04 |
| 750 | -10 | 0,09 | -0,34 | 122 | 9 | 5,16E-05 | -4,44E-07 | 1,78E-06 | -6,35E-04 |
| 810 | -8 | 0,07 | -0,27 | 96 | 7 | 6,20E-05 | -5,33E-07 | 2,16E-06 | -7,62E-04 |
| 870 | -6 | 0,05 | -0,21 | 75 | 5 | 8,34E-05 | -7,18E-07 | 2,93E-06 | -1,03E-03 |
| 940 | -5 | 0,04 | -0,16 | 57 | 4 | 1,75E-04 | -1,51E-06 | 6,20E-06 | -2,15E-03 |
| 950 | -4 | 0,04 | -0,16 | 54 | 4 | 2,15E-04 | -1,85E-06 | 7,61E-06 | -2,64E-03 |
| 960 | -4 | 0,04 | -0,15 | 52 | 4 | 2,80E-04 | -2,42E-06 | 9,95E-06 | -3,45E-03 |
| 970 | -4 | 0,04 | -0,14 | 50 | 4 | 4,12E-04 | -3,55E-06 | 1,46E-05 | -5,07E-03 |
| 980 | -4 | 0,03 | -0,14 | 48 | 4 | 8,08E-04 | -6,97E-06 | 2,87E-05 | -9,94E-03 |

Tabela E.2: Massa de água, gradientes de massa de água na superfície do tijolo e coeficientes de transferência de massa convectivo para secagem a 60°C ($m_{\text{água}_{eq}} = 3,083$ g, $m_{\text{tijolo}_{seco}} = 2609$ g).

| t [min] | $\partial m/\partial x$ [g/m] | $\partial m/\partial y$ [g/m] | $\partial m/\partial z$ [g/m] | $\partial m/\partial$ [g/m] | $m_{\text{água}}$ [g] | $h_{m,x}$ [m/s] | $h_{m,y}$ [m/s] | $h_{m,z}$ [m/s] | h_m [m/s] |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 10 | -267 | 2,74 | 1,68 | 2841 | 206 | 3,80E-05 | -3,91E-07 | -2,40E-07 | -4,04E-04 |
| 20 | -251 | 2,54 | 1,44 | 2696 | 195 | 3,79E-05 | -3,82E-07 | -2,18E-07 | -4,07E-04 |
| 30 | -238 | 2,36 | 1,14 | 2560 | 184 | 3,79E-05 | -3,77E-07 | -1,82E-07 | -4,09E-04 |
| 40 | -225 | 2,21 | 0,81 | 2430 | 175 | 3,81E-05 | -3,74E-07 | -1,37E-07 | -4,10E-04 |
| 50 | -214 | 2,08 | 0,49 | 2307 | 165 | 3,82E-05 | -3,71E-07 | -8,69E-08 | -4,12E-04 |
| 60 | -203 | 1,95 | 0,18 | 2189 | 156 | 3,83E-05 | -3,69E-07 | -3,43E-08 | -4,13E-04 |
| 70 | -193 | 1,84 | -0,09 | 2077 | 148 | 3,85E-05 | -3,68E-07 | 1,85E-08 | -4,15E-04 |
| 80 | -183 | 1,74 | -0,33 | 1970 | 140 | 3,86E-05 | -3,67E-07 | 7,00E-08 | -4,16E-04 |
| 90 | -174 | 1,64 | -0,53 | 1868 | 133 | 3,88E-05 | -3,67E-07 | 1,19E-07 | -4,17E-04 |
| 100 | -165 | 1,55 | -0,70 | 1771 | 126 | 3,89E-05 | -3,67E-07 | 1,66E-07 | -4,18E-04 |
| 110 | -157 | 1,47 | -0,84 | 1680 | 119 | 3,91E-05 | -3,67E-07 | 2,09E-07 | -4,19E-04 |
| 120 | -149 | 1,39 | -0,94 | 1593 | 113 | 3,92E-05 | -3,67E-07 | 2,49E-07 | -4,20E-04 |
| 130 | -141 | 1,32 | -1,03 | 1510 | 107 | 3,93E-05 | -3,67E-07 | 2,86E-07 | -4,20E-04 |
| 140 | -134 | 1,25 | -1,09 | 1432 | 101 | 3,95E-05 | -3,68E-07 | 3,20E-07 | -4,21E-04 |
| 150 | -127 | 1,18 | -1,13 | 1358 | 96 | 3,96E-05 | -3,68E-07 | 3,50E-07 | -4,22E-04 |
| 160 | -121 | 1,12 | -1,15 | 1287 | 91 | 3,97E-05 | -3,69E-07 | 3,79E-07 | -4,23E-04 |
| 170 | -115 | 1,06 | -1,16 | 1220 | 86 | 3,98E-05 | -3,70E-07 | 4,04E-07 | -4,24E-04 |
| 180 | -109 | 1,01 | -1,17 | 1157 | 82 | 4,00E-05 | -3,70E-07 | 4,28E-07 | -4,25E-04 |
| 190 | -103 | 0,96 | -1,16 | 1097 | 78 | 4,01E-05 | -3,71E-07 | 4,49E-07 | -4,25E-04 |
| 200 | -98 | 0,91 | -1,14 | 1040 | 74 | 4,02E-05 | -3,72E-07 | 4,68E-07 | -4,26E-04 |
| 210 | -93 | 0,86 | -1,12 | 986 | 70 | 4,03E-05 | -3,73E-07 | 4,85E-07 | -4,27E-04 |
| 220 | -88 | 0,82 | -1,09 | 935 | 66 | 4,04E-05 | -3,74E-07 | 5,01E-07 | -4,28E-04 |
| 230 | -84 | 0,77 | -1,07 | 887 | 63 | 4,06E-05 | -3,75E-07 | 5,16E-07 | -4,29E-04 |
| 240 | -79 | 0,73 | -1,03 | 841 | 60 | 4,07E-05 | -3,76E-07 | 5,29E-07 | -4,31E-04 |
| 250 | -75 | 0,70 | -1,00 | 797 | 57 | 4,08E-05 | -3,77E-07 | 5,41E-07 | -4,32E-04 |
| 260 | -72 | 0,66 | -0,97 | 756 | 54 | 4,10E-05 | -3,79E-07 | 5,53E-07 | -4,33E-04 |
| 270 | -68 | 0,63 | -0,93 | 717 | 51 | 4,11E-05 | -3,80E-07 | 5,63E-07 | -4,34E-04 |
| 280 | -64 | 0,60 | -0,89 | 680 | 48 | 4,12E-05 | -3,81E-07 | 5,72E-07 | -4,36E-04 |
| 290 | -61 | 0,56 | -0,86 | 645 | 46 | 4,14E-05 | -3,83E-07 | 5,81E-07 | -4,37E-04 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|------|-------|-----|----|----------|-----------|----------|-----------|
| 300 | -58 | 0,54 | -0,82 | 612 | 43 | 4,15E-05 | -3,84E-07 | 5,90E-07 | -4,39E-04 |
| 310 | -55 | 0,51 | -0,79 | 580 | 41 | 4,17E-05 | -3,86E-07 | 5,98E-07 | -4,40E-04 |
| 340 | -47 | 0,43 | -0,69 | 495 | 35 | 4,23E-05 | -3,91E-07 | 6,19E-07 | -4,46E-04 |
| 370 | -40 | 0,37 | -0,60 | 422 | 30 | 4,29E-05 | -3,97E-07 | 6,39E-07 | -4,53E-04 |
| 400 | -34 | 0,32 | -0,51 | 361 | 26 | 4,37E-05 | -4,05E-07 | 6,58E-07 | -4,61E-04 |
| 430 | -29 | 0,27 | -0,44 | 308 | 22 | 4,46E-05 | -4,14E-07 | 6,77E-07 | -4,71E-04 |
| 460 | -25 | 0,23 | -0,38 | 263 | 19 | 4,58E-05 | -4,24E-07 | 6,99E-07 | -4,83E-04 |
| 490 | -21 | 0,20 | -0,33 | 224 | 16 | 4,72E-05 | -4,38E-07 | 7,24E-07 | -4,98E-04 |
| 520 | -18 | 0,17 | -0,28 | 192 | 14 | 4,90E-05 | -4,55E-07 | 7,54E-07 | -5,18E-04 |
| 580 | -13 | 0,12 | -0,20 | 140 | 10 | 5,42E-05 | -5,04E-07 | 8,39E-07 | -5,73E-04 |
| 640 | -10 | 0,09 | -0,15 | 102 | 7 | 6,36E-05 | -5,91E-07 | 9,85E-07 | -6,72E-04 |
| 700 | -7 | 0,07 | -0,11 | 75 | 6 | 8,32E-05 | -7,73E-07 | 1,29E-06 | -8,79E-04 |
| 760 | -5 | 0,05 | -0,08 | 54 | 4 | 1,44E-04 | -1,34E-06 | 2,24E-06 | -1,52E-03 |

Tabela E.3: Massa de água, gradientes de massa de água na superfície do tijolo e coeficientes de transferência de massa convectivo para secagem a 70°C ($m_{\text{água}_{eq}} = 0,869$ g, $m_{\text{tijolo}_{seco}} = 2647$ g).

| t [min] | $\partial m/\partial x$ [g/m] | $\partial m/\partial y$ [g/m] | $\partial m/\partial z$ [g/m] | $\partial m/\partial$ [g/m] | $m_{\text{água}}$ [g] | $h_{m,x}$ [m/s] | $h_{m,y}$ [m/s] | $h_{m,z}$ [m/s] | h_m [m/s] |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 10 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0 | 2 | 4,19E-05 | -4,46E-07 | -2,57E-07 | -4,32E-04 |
| 20 | -300 | 3,19 | 1,84 | 3087 | 220 | 4,21E-05 | -4,41E-07 | -1,97E-07 | -4,33E-04 |
| 30 | -283 | 2,95 | 1,32 | 2903 | 207 | 4,24E-05 | -4,38E-07 | -1,31E-07 | -4,34E-04 |
| 40 | -267 | 2,76 | 0,82 | 2726 | 194 | 4,26E-05 | -4,37E-07 | -7,20E-08 | -4,34E-04 |
| 50 | -251 | 2,58 | 0,42 | 2559 | 182 | 4,28E-05 | -4,37E-07 | -2,36E-08 | -4,34E-04 |
| 60 | -237 | 2,41 | 0,13 | 2401 | 170 | 4,30E-05 | -4,37E-07 | 1,47E-08 | -4,34E-04 |
| 70 | -223 | 2,26 | -0,08 | 2253 | 160 | 4,31E-05 | -4,37E-07 | 4,43E-08 | -4,35E-04 |
| 80 | -209 | 2,12 | -0,22 | 2113 | 150 | 4,32E-05 | -4,37E-07 | 6,70E-08 | -4,35E-04 |
| 90 | -197 | 1,99 | -0,31 | 1982 | 141 | 4,32E-05 | -4,37E-07 | 8,43E-08 | -4,35E-04 |
| 100 | -185 | 1,87 | -0,36 | 1860 | 132 | 4,33E-05 | -4,37E-07 | 9,76E-08 | -4,35E-04 |
| 110 | -174 | 1,75 | -0,39 | 1744 | 124 | 4,33E-05 | -4,38E-07 | 1,08E-07 | -4,35E-04 |
| 120 | -163 | 1,65 | -0,40 | 1636 | 116 | 4,33E-05 | -4,38E-07 | 1,15E-07 | -4,35E-04 |
| 130 | -153 | 1,55 | -0,41 | 1535 | 109 | 4,34E-05 | -4,38E-07 | 1,21E-07 | -4,35E-04 |
| 140 | -143 | 1,45 | -0,40 | 1440 | 102 | 4,34E-05 | -4,39E-07 | 1,26E-07 | -4,36E-04 |
| 150 | -135 | 1,36 | -0,39 | 1352 | 96 | 4,34E-05 | -4,39E-07 | 1,30E-07 | -4,36E-04 |
| 160 | -126 | 1,28 | -0,38 | 1268 | 90 | 4,34E-05 | -4,39E-07 | 1,32E-07 | -4,36E-04 |
| 170 | -118 | 1,20 | -0,36 | 1190 | 85 | 4,34E-05 | -4,39E-07 | 1,35E-07 | -4,36E-04 |
| 180 | -111 | 1,12 | -0,34 | 1117 | 79 | 4,34E-05 | -4,40E-07 | 1,36E-07 | -4,36E-04 |
| 190 | -104 | 1,06 | -0,33 | 1048 | 75 | 4,34E-05 | -4,40E-07 | 1,38E-07 | -4,37E-04 |
| 200 | -98 | 0,99 | -0,31 | 983 | 70 | 4,35E-05 | -4,40E-07 | 1,39E-07 | -4,37E-04 |
| 210 | -92 | 0,93 | -0,29 | 923 | 66 | 4,35E-05 | -4,40E-07 | 1,40E-07 | -4,37E-04 |
| 220 | -86 | 0,87 | -0,28 | 866 | 62 | 4,35E-05 | -4,41E-07 | 1,41E-07 | -4,37E-04 |
| 230 | -81 | 0,82 | -0,26 | 813 | 58 | 4,35E-05 | -4,41E-07 | 1,41E-07 | -4,38E-04 |
| 240 | -76 | 0,77 | -0,25 | 763 | 54 | 4,35E-05 | -4,41E-07 | 1,42E-07 | -4,38E-04 |
| 250 | -71 | 0,72 | -0,23 | 716 | 51 | 4,35E-05 | -4,42E-07 | 1,42E-07 | -4,38E-04 |
| 260 | -67 | 0,68 | -0,22 | 672 | 48 | 4,36E-05 | -4,42E-07 | 1,43E-07 | -4,39E-04 |
| 290 | -63 | 0,64 | -0,21 | 631 | 45 | 4,37E-05 | -4,43E-07 | 1,44E-07 | -4,40E-04 |
| 320 | -52 | 0,53 | -0,17 | 522 | 37 | 4,38E-05 | -4,45E-07 | 1,44E-07 | -4,41E-04 |
| 350 | -43 | 0,44 | -0,14 | 432 | 31 | 4,39E-05 | -4,46E-07 | 1,45E-07 | -4,43E-04 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|------|-------|-----|----|----------|-----------|----------|-----------|
| 380 | -35 | 0,36 | -0,12 | 358 | 26 | 4,41E-05 | -4,49E-07 | 1,46E-07 | -4,46E-04 |
| 410 | -29 | 0,30 | -0,10 | 296 | 21 | 4,44E-05 | -4,51E-07 | 1,46E-07 | -4,48E-04 |
| 440 | -24 | 0,25 | -0,08 | 245 | 18 | 4,47E-05 | -4,55E-07 | 1,47E-07 | -4,52E-04 |
| 470 | -20 | 0,20 | -0,07 | 203 | 15 | 4,51E-05 | -4,59E-07 | 1,48E-07 | -4,56E-04 |
| 530 | -17 | 0,17 | -0,05 | 168 | 12 | 4,62E-05 | -4,70E-07 | 1,51E-07 | -4,67E-04 |
| 590 | -11 | 0,12 | -0,04 | 116 | 8 | 4,78E-05 | -4,87E-07 | 1,56E-07 | -4,84E-04 |
| 650 | -8 | 0,08 | -0,03 | 79 | 6 | 5,05E-05 | -5,15E-07 | 1,64E-07 | -5,12E-04 |
| 710 | -5 | 0,05 | -0,02 | 55 | 4 | 5,51E-05 | -5,62E-07 | 1,78E-07 | -5,58E-04 |
| 770 | -4 | 0,04 | -0,01 | 38 | 3 | 6,34E-05 | -6,46E-07 | 2,05E-07 | -6,43E-04 |
| 830 | -3 | 0,03 | -0,01 | 26 | 2 | 8,12E-05 | -8,28E-07 | 2,61E-07 | -8,23E-04 |
| 890 | -2 | 0,02 | -0,01 | 18 | 2 | 1,37E-04 | -1,40E-06 | 4,41E-07 | -1,39E-03 |

Tabela E.4: Massa de água, gradientes de massa de água na superfície do tijolo e coeficientes de transferência de massa convectivo para secagem a 80°C ($m_{\text{água}_{eq}} = 0,670$ g, $m_{\text{tijolo}_{seco}} = 2584$ g).

| t [min] | $\partial m/\partial x$ [g/m] | $\partial m/\partial y$ [g/m] | $\partial m/\partial z$ [g/m] | $\partial m/\partial t$ [g/m] | $m_{\text{água}}$ [g] | $h_{m,x}$ [m/s] | $h_{m,y}$ [m/s] | $h_{m,z}$ [m/s] | h_m [m/s] |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 10 | -307 | 3,31 | 1,65 | 3056 | 215 | 4,65E-05 | -5,01E-07 | -2,50E-07 | -4,62E-04 |
| 20 | -287 | 3,07 | 1,11 | 2842 | 200 | 4,68E-05 | -4,99E-07 | -1,80E-07 | -4,63E-04 |
| 30 | -268 | 2,85 | 0,80 | 2643 | 186 | 4,69E-05 | -4,99E-07 | -1,41E-07 | -4,63E-04 |
| 40 | -249 | 2,65 | 0,64 | 2457 | 173 | 4,70E-05 | -5,00E-07 | -1,20E-07 | -4,63E-04 |
| 50 | -232 | 2,47 | 0,54 | 2284 | 161 | 4,70E-05 | -5,00E-07 | -1,09E-07 | -4,63E-04 |
| 60 | -216 | 2,29 | 0,47 | 2124 | 149 | 4,70E-05 | -5,00E-07 | -1,03E-07 | -4,63E-04 |
| 70 | -200 | 2,13 | 0,42 | 1975 | 139 | 4,70E-05 | -5,00E-07 | -9,89E-08 | -4,63E-04 |
| 80 | -186 | 1,98 | 0,38 | 1836 | 129 | 4,70E-05 | -5,00E-07 | -9,65E-08 | -4,63E-04 |
| 90 | -173 | 1,85 | 0,35 | 1708 | 120 | 4,70E-05 | -5,00E-07 | -9,49E-08 | -4,63E-04 |
| 100 | -161 | 1,72 | 0,32 | 1589 | 112 | 4,69E-05 | -5,00E-07 | -9,38E-08 | -4,63E-04 |
| 110 | -150 | 1,60 | 0,30 | 1478 | 104 | 4,69E-05 | -5,01E-07 | -9,31E-08 | -4,63E-04 |
| 120 | -139 | 1,48 | 0,27 | 1375 | 97 | 4,69E-05 | -5,01E-07 | -9,26E-08 | -4,64E-04 |
| 130 | -129 | 1,38 | 0,25 | 1279 | 90 | 4,69E-05 | -5,01E-07 | -9,22E-08 | -4,64E-04 |
| 140 | -120 | 1,28 | 0,24 | 1190 | 84 | 4,69E-05 | -5,01E-07 | -9,20E-08 | -4,64E-04 |
| 150 | -112 | 1,20 | 0,22 | 1107 | 78 | 4,69E-05 | -5,01E-07 | -9,19E-08 | -4,64E-04 |
| 160 | -104 | 1,11 | 0,20 | 1031 | 73 | 4,69E-05 | -5,01E-07 | -9,18E-08 | -4,64E-04 |
| 170 | -97 | 1,03 | 0,19 | 959 | 68 | 4,69E-05 | -5,01E-07 | -9,19E-08 | -4,64E-04 |
| 180 | -90 | 0,96 | 0,18 | 893 | 63 | 4,69E-05 | -5,01E-07 | -9,19E-08 | -4,65E-04 |
| 190 | -84 | 0,90 | 0,16 | 831 | 59 | 4,69E-05 | -5,01E-07 | -9,21E-08 | -4,65E-04 |
| 200 | -78 | 0,83 | 0,15 | 773 | 55 | 4,69E-05 | -5,02E-07 | -9,22E-08 | -4,65E-04 |
| 210 | -73 | 0,78 | 0,14 | 720 | 51 | 4,69E-05 | -5,02E-07 | -9,24E-08 | -4,65E-04 |
| 220 | -67 | 0,72 | 0,13 | 670 | 47 | 4,69E-05 | -5,02E-07 | -9,25E-08 | -4,66E-04 |
| 230 | -63 | 0,67 | 0,12 | 624 | 44 | 4,69E-05 | -5,02E-07 | -9,27E-08 | -4,66E-04 |
| 240 | -58 | 0,63 | 0,12 | 581 | 41 | 4,69E-05 | -5,03E-07 | -9,29E-08 | -4,66E-04 |
| 250 | -54 | 0,58 | 0,11 | 541 | 38 | 4,69E-05 | -5,03E-07 | -9,31E-08 | -4,67E-04 |
| 260 | -51 | 0,54 | 0,10 | 504 | 36 | 4,69E-05 | -5,03E-07 | -9,34E-08 | -4,67E-04 |
| 270 | -47 | 0,51 | 0,09 | 469 | 33 | 4,70E-05 | -5,04E-07 | -9,36E-08 | -4,67E-04 |
| 300 | -38 | 0,41 | 0,08 | 379 | 27 | 4,71E-05 | -5,05E-07 | -9,43E-08 | -4,69E-04 |
| 330 | -31 | 0,33 | 0,06 | 306 | 22 | 4,72E-05 | -5,06E-07 | -9,50E-08 | -4,70E-04 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|------|------|-----|----|----------|-----------|-----------|-----------|
| 360 | -25 | 0,27 | 0,05 | 248 | 18 | 4,74E-05 | -5,09E-07 | -9,58E-08 | -4,73E-04 |
| 390 | -20 | 0,22 | 0,04 | 200 | 14 | 4,76E-05 | -5,11E-07 | -9,67E-08 | -4,75E-04 |
| 420 | -16 | 0,17 | 0,03 | 162 | 12 | 4,79E-05 | -5,15E-07 | -9,77E-08 | -4,78E-04 |
| 450 | -13 | 0,14 | 0,03 | 131 | 9 | 4,82E-05 | -5,19E-07 | -9,88E-08 | -4,83E-04 |
| 480 | -11 | 0,11 | 0,02 | 106 | 8 | 4,87E-05 | -5,24E-07 | -1,00E-07 | -4,88E-04 |
| 540 | -7 | 0,07 | 0,01 | 69 | 5 | 5,02E-05 | -5,40E-07 | -1,04E-07 | -5,02E-04 |
| 600 | -5 | 0,05 | 0,01 | 46 | 3 | 5,25E-05 | -5,66E-07 | -1,09E-07 | -5,26E-04 |
| 660 | -3 | 0,03 | 0,01 | 30 | 2 | 5,66E-05 | -6,10E-07 | -1,18E-07 | -5,68E-04 |
| 720 | -2 | 0,02 | 0,00 | 20 | 2 | 6,43E-05 | -6,93E-07 | -1,34E-07 | -6,45E-04 |
| 780 | -1 | 0,01 | 0,00 | 13 | 1 | 8,10E-05 | -8,74E-07 | -1,70E-07 | -8,14E-04 |
| 840 | -1 | 0,01 | 0,00 | 8 | 1 | 1,34E-04 | -1,45E-06 | -2,82E-07 | -1,35E-03 |
| 900 | -1 | 0,01 | 0,00 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela E.5: Massa de água, gradientes de massa de água na superfície do tijolo e coeficientes de transferência de massa convectivo para secagem a 90°C ($m_{\text{água}_{eq}} = 1,472$ g, $m_{\text{tijolo}_{seco}} = 2638$ g).

| t [min] | $\partial m/\partial x$ [g/m] | $\partial m/\partial y$ [g/m] | $\partial m/\partial z$ [g/m] | $\partial m/\partial t$ [g/m] | $m_{\text{água}}$ [g] | $h_{m,x}$ [m/s] | $h_{m,y}$ [m/s] | $h_{m,z}$ [m/s] | h_m [m/s] |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 10 | -342 | 3,77 | 1,67 | 3317 | 231 | 5,11E-05 | -5,62E-07 | -2,49E-07 | -4,95E-04 |
| 20 | -316 | 3,48 | 1,41 | 3060 | 213 | 5,12E-05 | -5,63E-07 | -2,28E-07 | -4,95E-04 |
| 30 | -291 | 3,21 | 1,27 | 2824 | 196 | 5,11E-05 | -5,63E-07 | -2,22E-07 | -4,96E-04 |
| 40 | -269 | 2,96 | 1,15 | 2606 | 181 | 5,11E-05 | -5,63E-07 | -2,20E-07 | -4,96E-04 |
| 50 | -248 | 2,73 | 1,06 | 2405 | 167 | 5,11E-05 | -5,63E-07 | -2,18E-07 | -4,96E-04 |
| 60 | -228 | 2,52 | 0,97 | 2220 | 155 | 5,11E-05 | -5,63E-07 | -2,17E-07 | -4,96E-04 |
| 70 | -211 | 2,33 | 0,89 | 2050 | 143 | 5,10E-05 | -5,64E-07 | -2,17E-07 | -4,97E-04 |
| 80 | -194 | 2,15 | 0,82 | 1893 | 132 | 5,10E-05 | -5,64E-07 | -2,16E-07 | -4,97E-04 |
| 90 | -179 | 1,98 | 0,76 | 1748 | 122 | 5,10E-05 | -5,64E-07 | -2,16E-07 | -4,97E-04 |
| 100 | -165 | 1,83 | 0,70 | 1614 | 112 | 5,10E-05 | -5,65E-07 | -2,16E-07 | -4,98E-04 |
| 110 | -153 | 1,69 | 0,65 | 1491 | 104 | 5,10E-05 | -5,65E-07 | -2,16E-07 | -4,98E-04 |
| 120 | -141 | 1,56 | 0,60 | 1377 | 96 | 5,10E-05 | -5,65E-07 | -2,16E-07 | -4,99E-04 |
| 130 | -130 | 1,44 | 0,55 | 1273 | 89 | 5,11E-05 | -5,66E-07 | -2,17E-07 | -4,99E-04 |
| 140 | -120 | 1,33 | 0,51 | 1176 | 82 | 5,11E-05 | -5,66E-07 | -2,17E-07 | -5,00E-04 |
| 150 | -111 | 1,23 | 0,47 | 1087 | 76 | 5,11E-05 | -5,67E-07 | -2,17E-07 | -5,00E-04 |
| 160 | -102 | 1,14 | 0,44 | 1004 | 70 | 5,11E-05 | -5,67E-07 | -2,17E-07 | -5,01E-04 |
| 170 | -95 | 1,05 | 0,40 | 928 | 65 | 5,12E-05 | -5,68E-07 | -2,18E-07 | -5,02E-04 |
| 180 | -87 | 0,97 | 0,37 | 858 | 60 | 5,12E-05 | -5,69E-07 | -2,18E-07 | -5,03E-04 |
| 190 | -81 | 0,90 | 0,34 | 793 | 55 | 5,13E-05 | -5,70E-07 | -2,19E-07 | -5,03E-04 |
| 200 | -75 | 0,83 | 0,32 | 733 | 51 | 5,14E-05 | -5,70E-07 | -2,19E-07 | -5,04E-04 |
| 210 | -69 | 0,77 | 0,29 | 678 | 47 | 5,14E-05 | -5,71E-07 | -2,19E-07 | -5,05E-04 |
| 220 | -64 | 0,71 | 0,27 | 627 | 44 | 5,15E-05 | -5,72E-07 | -2,20E-07 | -5,06E-04 |
| 230 | -59 | 0,66 | 0,25 | 580 | 41 | 5,16E-05 | -5,74E-07 | -2,20E-07 | -5,08E-04 |
| 240 | -54 | 0,61 | 0,23 | 536 | 38 | 5,17E-05 | -5,75E-07 | -2,21E-07 | -5,09E-04 |
| 270 | -43 | 0,48 | 0,18 | 424 | 30 | 5,21E-05 | -5,80E-07 | -2,23E-07 | -5,13E-04 |
| 300 | -34 | 0,38 | 0,15 | 336 | 24 | 5,26E-05 | -5,86E-07 | -2,26E-07 | -5,19E-04 |
| 330 | -27 | 0,30 | 0,12 | 266 | 19 | 5,33E-05 | -5,93E-07 | -2,29E-07 | -5,26E-04 |
| 360 | -21 | 0,24 | 0,09 | 211 | 15 | 5,42E-05 | -6,04E-07 | -2,33E-07 | -5,35E-04 |
| 390 | -17 | 0,19 | 0,07 | 167 | 12 | 5,53E-05 | -6,17E-07 | -2,38E-07 | -5,48E-04 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|------|------|-----|---|----------|-----------|-----------|-----------|
| 450 | -11 | 0,12 | 0,05 | 105 | 8 | 5,91E-05 | -6,60E-07 | -2,55E-07 | -5,86E-04 |
| 510 | -7 | 0,07 | 0,03 | 66 | 5 | 6,64E-05 | -7,42E-07 | -2,87E-07 | -6,59E-04 |
| 570 | -4 | 0,05 | 0,02 | 42 | 3 | 8,26E-05 | -9,23E-07 | -3,57E-07 | -8,20E-04 |
| 630 | -3 | 0,03 | 0,01 | 26 | 2 | 1,35E-04 | -1,51E-06 | -5,84E-07 | -1,34E-03 |
| 690 | -2 | 0,02 | 0,01 | 17 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela E.6: Massa de água, gradientes de massa de água na superfície do tijolo e coeficientes de transferência de massa convectivo para secagem a 100°C ($m_{\text{água}_{eq}} = 0,473$ g, $m_{\text{tijolo}_{seco}} = 2603$ g).

| t [min] | $\partial m/\partial x$ [g/m] | $\partial m/\partial y$ [g/m] | $\partial m/\partial z$ [g/m] | $\partial m/\partial$ [g/m] | $m_{\text{água}}$ [g] | $h_{m,x}$ [m/s] | $h_{m,y}$ [m/s] | $h_{m,z}$ [m/s] | h_m [m/s] |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 10 | -370 | 4,13 | 1,83 | 3527 | 243 | 5,51E-05 | -6,15E-07 | -2,73E-07 | -5,25E-04 |
| 20 | -339 | 3,79 | 1,66 | 3234 | 223 | 5,51E-05 | -6,15E-07 | -2,69E-07 | -5,25E-04 |
| 30 | -310 | 3,47 | 1,51 | 2966 | 204 | 5,50E-05 | -6,15E-07 | -2,67E-07 | -5,25E-04 |
| 40 | -284 | 3,18 | 1,38 | 2720 | 187 | 5,49E-05 | -6,14E-07 | -2,66E-07 | -5,25E-04 |
| 50 | -261 | 2,92 | 1,26 | 2495 | 172 | 5,49E-05 | -6,14E-07 | -2,66E-07 | -5,25E-04 |
| 60 | -239 | 2,68 | 1,15 | 2290 | 158 | 5,48E-05 | -6,14E-07 | -2,65E-07 | -5,25E-04 |
| 70 | -219 | 2,45 | 1,06 | 2101 | 145 | 5,47E-05 | -6,14E-07 | -2,64E-07 | -5,26E-04 |
| 80 | -201 | 2,25 | 0,97 | 1929 | 133 | 5,47E-05 | -6,14E-07 | -2,64E-07 | -5,26E-04 |
| 90 | -184 | 2,07 | 0,89 | 1770 | 122 | 5,47E-05 | -6,14E-07 | -2,63E-07 | -5,26E-04 |
| 100 | -169 | 1,90 | 0,81 | 1625 | 112 | 5,46E-05 | -6,14E-07 | -2,63E-07 | -5,26E-04 |
| 110 | -155 | 1,74 | 0,75 | 1492 | 103 | 5,46E-05 | -6,14E-07 | -2,63E-07 | -5,26E-04 |
| 120 | -142 | 1,60 | 0,68 | 1371 | 94 | 5,46E-05 | -6,14E-07 | -2,63E-07 | -5,26E-04 |
| 130 | -130 | 1,47 | 0,63 | 1259 | 87 | 5,45E-05 | -6,14E-07 | -2,63E-07 | -5,26E-04 |
| 140 | -120 | 1,35 | 0,58 | 1156 | 80 | 5,45E-05 | -6,14E-07 | -2,63E-07 | -5,26E-04 |
| 150 | -110 | 1,24 | 0,53 | 1062 | 73 | 5,45E-05 | -6,14E-07 | -2,62E-07 | -5,26E-04 |
| 160 | -101 | 1,14 | 0,49 | 976 | 67 | 5,45E-05 | -6,14E-07 | -2,62E-07 | -5,27E-04 |
| 170 | -93 | 1,04 | 0,45 | 897 | 62 | 5,44E-05 | -6,14E-07 | -2,62E-07 | -5,27E-04 |
| 180 | -85 | 0,96 | 0,41 | 824 | 57 | 5,44E-05 | -6,14E-07 | -2,62E-07 | -5,27E-04 |
| 190 | -78 | 0,88 | 0,38 | 757 | 52 | 5,44E-05 | -6,14E-07 | -2,62E-07 | -5,27E-04 |
| 200 | -72 | 0,81 | 0,35 | 696 | 48 | 5,44E-05 | -6,14E-07 | -2,62E-07 | -5,27E-04 |
| 230 | -56 | 0,63 | 0,27 | 541 | 37 | 5,44E-05 | -6,14E-07 | -2,63E-07 | -5,28E-04 |
| 260 | -43 | 0,49 | 0,21 | 420 | 29 | 5,44E-05 | -6,15E-07 | -2,63E-07 | -5,29E-04 |
| 290 | -34 | 0,38 | 0,16 | 327 | 23 | 5,44E-05 | -6,16E-07 | -2,63E-07 | -5,30E-04 |
| 320 | -26 | 0,30 | 0,13 | 255 | 18 | 5,45E-05 | -6,17E-07 | -2,64E-07 | -5,31E-04 |
| 350 | -20 | 0,23 | 0,10 | 198 | 14 | 5,46E-05 | -6,19E-07 | -2,65E-07 | -5,33E-04 |
| 380 | -16 | 0,18 | 0,08 | 154 | 11 | 5,48E-05 | -6,21E-07 | -2,66E-07 | -5,35E-04 |
| 440 | -10 | 0,11 | 0,05 | 94 | 7 | 5,54E-05 | -6,29E-07 | -2,69E-07 | -5,42E-04 |
| 500 | -6 | 0,07 | 0,03 | 57 | 4 | 5,65E-05 | -6,42E-07 | -2,75E-07 | -5,54E-04 |
| 560 | -4 | 0,04 | 0,02 | 35 | 3 | 5,85E-05 | -6,65E-07 | -2,85E-07 | -5,74E-04 |

| | | | | | | | | | |
|-----|----|------|------|----|-----|----------|-----------|-----------|-----------|
| 620 | -2 | 0,02 | 0,01 | 21 | 2 | 6,22E-05 | -7,07E-07 | -3,02E-07 | -6,10E-04 |
| 680 | -1 | 0,02 | 0,01 | 13 | 1 | 6,93E-05 | -7,88E-07 | -3,37E-07 | -6,81E-04 |
| 740 | -1 | 0,01 | 0,00 | 8 | 1 | 8,53E-05 | -9,71E-07 | -4,15E-07 | -8,39E-04 |
| 800 | 0 | 0,01 | 0,00 | 5 | 1 | 1,37E-04 | -1,56E-06 | -6,69E-07 | -1,35E-03 |
| 860 | 0 | 0,00 | 0,00 | 3 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |