



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA – PPGEQ

JOÃO PAULO PAES DE ARAÚJO SILVA

**ESTUDO NUMÉRICO (VIA CFX) E EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE BLOCOS
CERÂMICOS**

CAMPINA GRANDE
2024

JOÃO PAULO PAES DE ARAÚJO SILVA

**ESTUDO NUMÉRICO (VIA CFX) E EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE BLOCOS
CERÂMICOS**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito obrigatório para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Área de Concentração: Desenvolvimento de processos químicos.

ORIENTADOR: Dr. ANTÔNIO TAVERNARD PEREIRA NETO

CAMPINA GRANDE

2024

S586e Silva, João Paulo Paes de Araújo.
Estudo numérico (via CFX) e experimental da secagem de blocos cerâmicos / João Paulo Paes de Araújo Silva. – Campina Grande, 2024.
207 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.
"Orientação: Prof. Dr. Antônio Tavernard Pereira Neto".
Referências.

1. Secagem de Tijolo Ecológico. 2. Lodo de Estação de Tratamento de Água. 3. Modelagem e Simulação Computacional. 4. Modelagem Numérica. 5. Coeficiente de Difusividade. I. Pereira Neto, Antônio Tavernard. II. Título.

CDU 66.047:666.71(043)

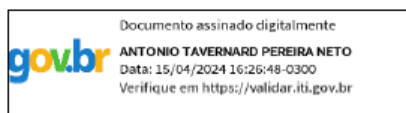
JOÃO PAULO PAES DE ARAÚJO SILVA

ESTUDO NUMÉRICO (VIA CFX) E EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE BLOCOS CERÂMICOS

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito obrigatório para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

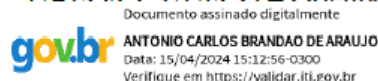
Área de Concentração: Desenvolvimento de processos químicos.

Aprovado em: 28/04/2023.



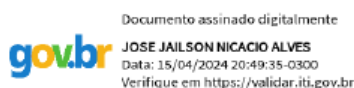
Dr. Antônio Tavernard Pereira Neto

UAEQ/CCT/IECG – Orientador



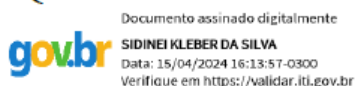
Dr. Antônio Carlos Brandão de Araújo

UAEQ/CCT/UFCG – Examinador Interno



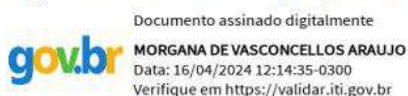
Dr. José Jailson Nicácio Alves

UAEQ/CCT/UFCG – Examinador Interno



Dr. Sidinei Kleber da Silva

UAEQ/CCT/UFCG – Examinador Interno



Dr.^a Morgana de Vasconcellos Araújo

UAEB/CDSA/UFCG – Examinadora Externa



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900
Telefone: (83) 2101-1100
Site: <http://cct.ufcg.edu.br>

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA, REALIZADA EM 28
DE ABRIL DE 2023 (Nº 136)

CANDIDATO(A): João Paulo Paes de Araújo Silva. COMISSÃO EXAMINADORA: Antônio Carlos Brandao de Araújo, Prof., Dr., UFCG/Presidente da Sessão e Examinador Interno, Antônio Tavernard Pereira Neto, Prof., Dr., UFCG/ Orientador, José Jailson Nicacio Alves, Prof., Dr., UFCG/Examinador Interno, Sidinei Kleber da Silva, Prof., Dr., UFCG/Examinador Externo, Morgana de Vasconcellos Araújo Prof^a, Dr^a, UFCG/Examinadora Externa. TÍTULO DA TESE: “ESTUDO NUMÉRICO (VIA CFX) E EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE BLOCOS CERÂMICOS”. ÁREA CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos Químicos - HORA DE INÍCIO: 09:30 horas – LOCAL: por videoconferência. Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, sendo **APROVADO**. Face à aprovação, declara o(a) Presidente da Comissão, achar-se a examinada, legalmente habilitado a receber o Grau de Doutor, no domínio da Engenharia Química, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como direito, providenciar a expedição do Diploma, o que o mesmo faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Maricé Pereira de Araújo - Secretária - do PPGEQ e os membros da Comissão Examinadora e o(a) candidato(a). Campina Grande, 28 de abril de 2023.

Maricé Pereira de Araújo
Secretária

Antônio Carlos Brandao de Araújo, Prof., Dr., UFCG
Presidente da Comissão e Examinador Interno

Antônio Tavernard Pereira Neto, Prof., Dr., UFCG
Orientador

José Jailson Nicacio Alves, Prof., Dr., UFCG
Examinador Interno

Sidinei Kleber da Silva, Prof., Dr., UFCG

Examinador Externo

Morgana de Vasconcellos Araújo Prof^ª., Dr^ª., UFCG

Examinadora Externa

João Paulo Paes de Araújo Silva

Candidato



Documento assinado eletronicamente por **ANTONIO CARLOS BRANDAO DE ARAUJO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 28/04/2023, às 12:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANTONIO TAVERNARD PEREIRA NETO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 28/04/2023, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **SIDINEI KLEBER DA SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 28/04/2023, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE JAILSON NICACIO ALVES, PROFESSOR 3 GRAU**, em 28/04/2023, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Morgana de Vasconcellos Araújo, Usuário Externo**, em 28/04/2023, às 12:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARICE PEREIRA DA SILVA, SECRETÁRIA**, em 04/05/2023, às 09:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Paulo Paes de Araújo Silva, Usuário Externo**, em 04/05/2023, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador 3330784 e o código CRC EDE2EFF4.

DEDICATÓRIA

À todos que em essência
contribuíram para a aquisição
desse tão sonhado título de Doutor.

AGRADECIMENTO

Ao meu Criador, que sempre quando recorro, Ele me assiste.

Ao meu orientador Dr. Antônio Tavernard a minha gratidão por ao longo desta caminhada de 6 anos ter confiado em mim e no meu projeto, orientando-me de forma impecável. Sou grato por sua atitude de nunca ter soltado a minha mão, mesmo nos momentos de dificuldade intensificados pelas adversidades da pandemia COVID-19 vivenciadas a uma distância de 450 Km da UFCG, por conta do trabalho que desempenho na Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) como engenheiro químico.

Aos coorientadores que a vida me deu, minha mãe Maria Bernadete Paes e meu pai José Renan Oliveira, por todos os ensinamentos a mim repassados, e por todo o carinho, paciência e incentivo investidos em mim desde o dia do processo seletivo para este doutorado em 2018.1, até hoje.

Agradeço à banca nas pessoas dos Profs. Dr. Sidinei Kleber que com a disposição sempre serena apontou melhorias essenciais de forma muito assertiva para a realização desta defesa. Ao Dr. Jailson Nicácio que, sempre prestativo/disponível, tem dado contribuições desde a concepção deste projeto. Ao alagoano Dr. Antônio Brandão pela infalível disponibilidade e ideias visando à contextualização da região no presente trabalho. À Dr.^a Morgana Araújo que em meio as suas diversas atividades nunca se furtou de prestar auxílio para este trabalho.

Ao seu Lula, dono do imóvel em Campina Grande que me acolhe desde 2013, ao Daniel que foi um amigo para diversos momentos ao longo dessa trajetória e a Sheilla Bello que me auxiliou de forma providencial na qualificação.

Agradeço à CASAL, na pessoa do Coord. de operações Maceliano Teixeira, e a Prefeitura de Piranhas, na gestão do Pref. Thiago, por terem disponibilizado a ETA do Povoado Piau, município de Piranhas (AL), para a realização da pesquisa experimental de desenvolvimento de um tijolo ecológico que leva em sua composição o resíduo sólido lodo, subproduto do processo de tratamento da água.

Agradeço à UFAL, na pessoa do mestre Alexandre Nascimento, por ter sempre sido prestativo/amigável e ter viabilizado o LAME e seus conhecimentos para a realização dos ensaios de resistência mecânica visando o desenvolvimento de tijolos ecológicos. Da mesma forma, agradeço o auxílio da Eng.^a civil Erika Fernanda Lisboa que se transformou em ponte para que a teoria pudesse se concretizar em prática, tanto com seus conhecimentos quanto com seus contatos na UFAL.

EPÍGRAFE

“Há momentos difíceis pela vida
Que a gente pensa em desistir
Jogar tudo pro alto...

Será o estresse que desce nas veias dos corações
Ou é uma prece que tece a teia de novas paixões....

Mas não são os meus pecados
Que irão lhe absolver
É muito mais a idéia
De enfrentar o problema e de resolver...”

(Zé Ramalho, A única coisa que eu quero, 2002)

RESUMO

SILVA, João Paulo Paes de Araújo. **Estudo numérico (via CFX) e experimental da secagem de blocos cerâmicos**. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, 2022. Qualificação (doutorado).

Tendo em vista que o Brasil possui um importante parque fabril no setor cerâmico, matéria-prima em abundância, uma taxa de crescimento estável no setor de construção civil e é um dos maiores consumidores do mundo de material cerâmico, o desenvolvimento desse setor é influenciado pela qualidade do seu produto e do custo da sua produção, os quais dependem diretamente de uma eficiente etapa de secagem, etapa na qual a demanda energética é alta e, geralmente, atendida por fontes de energia não-renováveis, causadoras de impacto ambiental por meio da emissão de CO₂. A presente Tese visa tanto o desenvolvimento de um modelo numérico de secagem de tijolo em estufa (via CFX), quanto o desenvolvimento de tijolo ecológico para produção industrial. Utilizou-se o trabalho experimental de nascimento (2002) para a validação do modelo numérico desenvolvido nesta tese, que adotou o modelo de difusão líquida como transporte mássico entre os domínios, como utilizado em Araújo (2019) e Santos (2019). Assim, buscou-se a determinação, numericamente/experimentalmente, da difusividade no tijolo em temperaturas 60, 80 e 110°C, bem como a determinação dos parâmetros da equação de Arrhenius. Dessa forma são apresentados em imagens gráficas, por meio da simulação numérica, os comportamentos mássicos e térmicos através dos seus campos de gradientes e das suas curvas de cinéticas em tempos e temperaturas de secagens diferentes. Vale salientar que o presente modelo também retratou o comportamento de variáveis externas ao tijolo, como temperatura e velocidade da corrente de ar quente que o envolve, e ao levar em conta condições do entorno, o modelo torna os resultados mais próximos do real. A parte experimental do trabalho de produção do tijolo ecológico foi realizada no laboratório da Estação de Tratamento de Água (ETA), situado em Piranhas (AL), a qual é operada pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL). Visando uma maior sustentabilidade nos processos produtivos não só do tijolo industrial, mas também do tratamento da água, buscou-se o desenvolvimento de um tijolo ecológico através do uso do lodo de ETA na composição da massa argilosa, uma vez que esse resíduo é rico em Alumínio, capaz de agregar maior resistência ao tijolo. Assim, foi viabilizada no sertão alagoano, de forma inédita, uma destinação limpa para esse resíduo, bem como a produção de um tijolo ecológico sem a etapa de queima, conciliando, assim, os interesses sustentáveis em comum dos setores industriais: saneamento e cerâmico.

Palavras-chaves: modelagem numérica; coeficiente de difusividade; secagem de tijolo ecológico; lodo de ETA.

ABSTRACT

SILVA, Joao Paulo Paes de Araujo. **Numerical (via CFX) and experimental study of the drying of ceramic blocks.** Campina Grande: Pós-Graduate in Chemical Engineering, Federal University of Campina Grande, 2022. PhD.

Bearing in mind that Brazil, in addition to having an important industrial park in the ceramic sector, raw materials in abundance, a stable growth rate in the civil construction sector and also being one of the largest consumers of ceramic material in the world, leads us to realizing that this sector only depends on the quality of its product and the cost of its production, which directly depend on an efficient drying stage. Stage in which the energy demand is high and, generally, met by non-renewable energy sources, causing environmental impact through the emission of CO₂. The present thesis aims at both the development of a numerical model for drying brick in an oven (via CFX) and the development of an ecological brick for industrial production. The experimental work from Nascimento (2002) was used to validate the numerical model developed in this thesis, which adopted the liquid diffusion model as mass transport between domains, as used by Araújo (2019) and Santos (2019). Thus, the determination by numerical model of the diffusivity in the brick at temperatures 60, 80 and 110°C was sought, as well as the determination of the parameters of the Arrhenius equation for the brick-greenhouse system. In this way, the mass and thermal behaviors are presented in graphic images, through numerical simulation, through their gradient fields and their kinetic curves in different drying times and temperatures. It is worth mentioning that the present model also portrayed the behavior of variables external to the brick, such as temperature and velocity of the hot air current that surrounds it, and when taking into account the surrounding conditions, the model makes the results closer to the real. The experimental part of the ecological brick production work was carried out in the laboratory of the Water Treatment Station (ETA), located in Piranhas (AL), which is operated by Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL). Aiming at greater sustainability in the production processes, not only of the industrial brick, but also of water treatment, an attempt was made to develop an ecological brick through the use of ETA sludge in the composition of the clayey mass, since this residue is rich in aluminum, capable of adding greater resistance to the brick, allowing it to meet NBR 16814, which stipulates the minimum resistance for an ecological brick. Thus, in an unprecedented way, a clean destination for this waste was made possible in the backlands of Alagoas, as well as the production of an ecological brick without the burning stage, thus reconciling the sustainable interests in common of the industrial sectors: sanitation and ceramics.

Keywords: numerical modeling; diffusivity coefficient; ecological brick drying; sludge from Water Treatment Station.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diferentes composições produzem argilas com diferentes cores.....	8
Figura 2.2: Determinação do ponto de umidade crítica.....	26
Figura 3.1: Domínio computacional refinado. Fonte: Acervo do autor, 2023.	66
Figura 3.2: Detalhe de refinamento sobre o bloco cerâmico. Fonte: Acervo do autor, 2023...	67
Figura 3.3: Turbidímetro utilizado nos ensaios para medir a turbidez das amostras.	77
Figura 3.4: Colorímetro utilizado nos ensaios para medir a cor das amostras.	77
Figura 4.1: Linhas 1, 2 e 3 para análise.	84
Figura 4.2: Linhas 4, 5 e 6 para análise.	85
Figura 4.3: Linhas 7, 8 e 9 para análise.	85
Figura 4.4: Planos sobre os eixos XY para análise.....	86
Figura 4.5: Planos sobre os eixos YZ para análise.	86
Figura 4.6: Planos sobre os eixos XZ para análise.	87
Figura 4.7: O gráfico relaciona a difusividade mássica da água no bloco cerâmico e a temperatura da fase gasosa dentro do secador.	89
Figura 4.8: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=60$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$	93
Figura 4.9: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=270$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$	93
Figura 4.10: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=10$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$	94
Figura 4.11: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=60$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$	94
Figura 4.12: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=270$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$	95
Figura 4.13: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=10$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$	95
Figura 4.14: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=60$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$	96
Figura 4.15: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=270$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$	96
Figura 4.16: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ, ($y = -1,51125$ cm) para a secagem a 60°C	100
Figura 4.17: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ, ($y = 0$ cm) para a secagem a 60°C	101
Figura 4.18: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ, ($y = 1,51125$) para a secagem a 60°C	102
Figura 4.19: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ, ($y = 3,0225$ cm) para a secagem a 60°C	103
Figura 4.20: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = 0$ cm), para a secagem a 60°C	104
Figura 4.21: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = 1,51125$ cm), para a secagem a 60°C	105
Figura 4.22: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = 3,0225$ cm) para a secagem a 60°C	106
Figura 4.23: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = -3,0225$ cm) para a secagem a 60°C	107

Figura 4.24: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = -1,51125$ cm) para a secagem a 60°C	108
Figura 4.25: Campo de temperatura no interior tijolo, plano YX ($z = 0,706$ cm), para a secagem a 60°C	111
Figura 4.26: Campo de temperatura no interior tijolo, plano YX ($z = 0,5295$ cm), para a secagem a 60°C	112
Figura 4.27: Campo de temperatura no interior tijolo, plano YX ($z = 353$ cm), para a secagem a 60°C	113
Figura 4.28: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 706$ cm), para a secagem a 60°C	114
Figura 4.29: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,5295$ cm), para a secagem a 60°C	115
Figura 4.30: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,353$ cm), para a secagem a 60°C	116
Figura 4.31: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY, ($x = 0$ cm), para a secagem a 60°C	118
Figura 4.32: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY, ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 60°C	118
Figura 4.33: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY, ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 60°C	119
Figura 4.34: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY, ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 60°C	120
Figura 4.35: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY, ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 60°C	121
Figura 4.36: Comparação entre o resultado teórico e experimental da massa aquosa no interior do secador (Caso 2).....	122
Figura 4.37: Predição do teor de umidade médio e temperatura média do bloco cerâmico no decurso do tempo total (Caso 2).....	123
Figura 4.38: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=10$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$	124
Figura 4.39: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=60$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$	124
Figura 4.40: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=270$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$	125
Figura 4.41: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=10$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$	125
Figura 4.42: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=60$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$	126
Figura 4.43: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=10$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$	127
Figura 4.44: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=60$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$	127
Figura 4.45: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=270$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$	128
Figura 4.46: Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade no decurso do tempo (Caso 3).....	153
Figura 4.47: Predição do teor de umidade médio e temperatura média do bloco cerâmico no decurso do tempo total (Caso 3).....	153
Figura 4.48: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=10$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$	154

Figura 4.49: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=60$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.	154
Figura 4.50: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=10$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.	155
Figura 4.51: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=60$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.	156
Figura 4.52: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=270$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.	156
Figura 4.53: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=10$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.	157
Figura 4.54: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=10$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.	157
Figura 4.55: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=270$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.	158
Figura 4.56: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = -3,0225$ cm), para a secagem a 110°C .	160
Figura 4.57: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = 1,51125$ cm), para a secagem a 110°C .	161
Figura 4.58: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = 0$ cm), para a secagem a 110°C .	161
Figura 4.59: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = 1,51125$ cm), para a secagem a 110°C .	162
Figura 4.60: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = 3,0225$ cm), para a secagem a 110°C .	163
Figura 4.61: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y = -3,0225$ cm), para a secagem a 110°C .	164
Figura 4.62: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y = -1,51125$ cm), para a secagem a 110°C .	165
Figura 4.63: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y=0$ cm), para a secagem a 110°C .	166
Figura 4.64: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y = 1,51125$ cm), para a secagem a 110°C .	167
Figura 4.65: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y = 3,0225$ cm), para a secagem a 110°C .	168
Figura 4.66: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY ($x = 0$ cm), para a secagem a 110°C .	172
Figura 4.67: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 110°C .	172
Figura 4.68: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 110°C .	173
Figura 4.69: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 110°C .	174
Figura 4.70: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 110°C .	175
Figura 4.71: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,5295$ cm), para a secagem a 110°C .	177
Figura 4.72: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,353$ cm), para a secagem a 110°C .	178
Figura 4.73: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XY ($z = 0,706$ cm), para a secagem a 110°C .	179

Figura 4.74: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XY ($z = 0.5295$ cm), para a secagem a 110°C	180
Figura 4.75: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XY ($z = 0,353$ cm), para a secagem a 110°C	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Sensibilidade de argilas cerâmicas	28
Tabela 2.2: Sensibilidade e grau de sensibilidade	28
Tabela 2.3: Classificação das argilas segundo ABNT, índices de consistência e indicações.	29
Tabela 3.1: Dimensões do domínio computacional	66
Tabela 3.2: Refinamentos das malhas	66
Tabela 3.3: Refinamentos das malhas	70
Tabela 3.4: Condições iniciais para a execução da testagem de dependência de malha.	70
Tabela 4.2: Parâmetros obtidos de Nascimento (2002) em sua pesquisa empírica.	88
Tabela 4.3: Parâmetros da análise quantitativa para secagem a 60°C.	91
Tabela 4.4: Gradientes máximos de temperatura teor de umidade nos planos XZ.	98
Tabela 4.5: Gradientes máximos de temperatura teor de umidade nos planos XZ.	111
Tabela 4.6: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos ZY.	117
Tabela 4.7: Parâmetros da análise quantitativa para secagem a 80°C.	122
Tabela 4.8: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos XZ.	129
Tabela 4.9: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos YZ.	141
Tabela 4.10: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos XY.	146
Tabela 4.11: Parâmetros da análise quantitativa para secagem a 110°C.	152
Tabela 4.12: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos XY.	160
Tabela 4.13: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos ZY.	172
Tabela 4.14: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos XY.	176

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

1. LISTA DE SÍMBOLOS

1.1. Símbolos Latinos

c_S	Calor específico do sólido	[J/(kg.K)]
D_0	Fator de Arrhenius	[m ² /s]
D_{mf}	Coefficiente de difusão mássico no ar	[m ² /s]
D_{ms}	Coefficiente de difusão mássico no sólido	[m ² /s]
E_A	Energia de ativação para a difusão	[kJ/(kmol.K)]
E_M	Erro médio	[-]
h_c	Coefficiente de transferência de calor convectiva	[W/(m.K)]
h_m	Coefficiente 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]
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]
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]

1.2. Símbolos Gregos

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)]
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	[-]

1.3. Operadores matemáticos

∇	Gradiente
----------	-----------

2. LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD – *Computational Fluid Dynamic* (Fluidodinâmica Computacional)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral	3
1.2 Objetivos específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 A cerâmica vermelha	4
2.1.1 Utilização de materiais de origem cerâmica.....	4
2.1.2 Histórico da cerâmica vermelha	5
2.1.3 O segmento produtivo da cerâmica no brasil	6
2.2 Argila	7
2.2.1 Definição	7
2.2.2 Composição das argilas	9
2.2.3 Propriedades das argilas	11
2.2.4 Insumos: materiais fundentes	11
2.3 Bloco cerâmico	12
2.3.1 Processo de produção da cerâmica	13
2.3.2 Pré-tratamento da matéria-prima	15
2.3.3 Tratamento térmico do material argiloso.....	17
2.3.4 Expedicionamento	19
2.4 Secagem	21
2.4.1 Remoção de umidade dos argilominerais.....	21
2.4.2 Difusão mássica e térmica em materiais cerâmicos	22
2.4.3 Propriedades cerâmicas afetadas pela secagem.....	25
2.4.4 Propriedades das argilas	29
2.5 Propriedades dos materiais cerâmicos	32
2.5.1 Propriedades termofísicas.....	32
2.5.2 Propriedades mecânicas e elásticas	33
2.5.3 Características químicas	33
2.6 A operação de secagem do tipo convectiva	34
2.6.1 Teoria da difusão líquida	41
2.7 Processamento, aplicação e estudos experimentais dos materiais cerâmicos: revisão bibliográfica.....	44
2.8 A importância da modelagem computacional: revisão bibliográfica.	49
2.9 Desenvolvimento do tijolo ecológico por meio do lodo de ETA	51
2.9.2 A produção de resíduos em ETAs	57

3.	METODOLOGIA.....	65
3.1	Domínio computacional.....	65
3.2	Modelagem matemática.....	67
3.2.1	Equações governantes.....	67
3.2.2	Condições adotadas e variáveis envolvidas.....	69
3.2.3	Parâmetros físico-químicos das fases fluidas e sólida.....	70
3.3	Casos simulados.....	70
3.3.1	Tratamento.....	71
3.3.2	Sobre o coeficiente de transporte mássico convectivo.....	72
3.3.3	Coeficiente mássico difusivo e sua relação com a temperatura.....	72
3.4	Desenvolvimento do tijolo ecológico: Materiais e métodos.....	73
3.4.1	Materiais.....	73
3.4.3	Definição do estado (úmido/seco) e concentração do lodo na massa argilosa.....	81
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
4.1	Validação da quantidade de elementos na construção da malha.....	83
	Fonte: acervo do autor, 2023.....	83
4.2	Avaliação da composição mássica e perfil térmico bloco cerâmico.....	84
	Fonte: acervo do autor, 2023.....	84
4.3	Caso 1 (Argila Vermelha, T=60°C).....	91
4.3.1	Evolução Cinética de Secagem e Aquecimento do bloco cerâmico.....	91
4.3.2	Perfil linear de evolução térmica no bloco cerâmico.....	93
4.3.1	Comportamentos térmico e mássico no bloco cerâmico em três planos para T=60°C	97
4.4	Caso 2 (Argila Vermelha, T=80°C).....	122
4.4.1	Evolução Cinética de Secagem e Aquecimento do bloco cerâmico.....	122
4.4.1	Perfil linear de evolução térmica no bloco cerâmico.....	123
4.4.2	Comportamentos térmico e mássico no bloco cerâmico em três planos para T=80°C	128
4.5	Caso 3 (Argila Vermelha, T = 110°C).....	152
4.5.1	Evolução Cinética de Secagem e Aquecimento do bloco cerâmico.....	152
4.5.1	Perfil linear de evolução térmica no bloco cerâmico.....	153
4.5.2	Comportamentos térmico e mássico no bloco cerâmico em três planos para T=110°C.....	159
4.6	Estudo e desenvolvimento do tijolo ecológico.....	182
4.6.1	Determinação da resistência mecânica à compressão com utilização de lodo de ETA.	182
4.6.2	Dados da etapa de determinação do tipo de lodo a ser utilizado.....	182

4.6.3	Etapa de determinação da concentração do lodo a ser utilizada no tijolo	184
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	189
5.1	Conclusões	Erro! Indicador não definido.
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192
	APÊNDICE	199
	APÊNDICE A	199
	APÊNDICE B.....	202
	APÊNDICE C.....	203
	APÊNDICE D	206

1. INTRODUÇÃO

O processo termodinâmico denominado por secagem, por meio do qual ocorre a redução da concentração de umidade, se dá partindo do interior do material em direção à superfície mediante o fornecimento de calor. Nesta fase do processamento em questão, a água em excesso que está contida nele é removida por meio da transferência de massa, na forma líquida/vapor (NASCIMENTO *et al.*, 2004).

Segundo Bergman *et al.* (2014) e Incropera e DeWitt (2001), o transporte de calor pode ser definido como sendo o "trânsito de energia provocado por um gradiente de temperatura". Esse fenômeno pode acontecer por três processos diferentes que são: condução, convecção e radiação.

O controle do processo pelo qual a água em excesso é removida e o conhecimento dos diversos mecanismos envolvidos no transporte de umidade é de fundamental importância no processo termodinâmico denominado por secagem e estão diretamente relacionados com o tipo do material e concentração de umidade existente nele.

Nesse sentido, a simulação computacional validada com base em resultados experimentais é bastante promissora já que com estes dados pode-se trabalhar com possibilidades e previsões de condições ótimas de processo, melhorando a eficiência energética e por consequência a redução das perdas de insumos e produtos (NASCIMENTO *et al.*, 2004).

O segmento industrial da cerâmica vermelha produz tijolos furados, tijolos maciços, tabelas ou lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos. Está entre os segmentos que mais precisam de melhorias no controle de qualidade, podendo ser beneficiado com o desenvolvimento da área de simulação computacional. Constata-se que parte representativa da produção nacional da cerâmica vermelha é proveniente de processos de origem artesanal, que se instalam próximos às fontes de insumos materiais e energéticos (SINDICER, 2022).

Não obstante o processamento de produção de peças cerâmicas ser tratado de forma simplificada como um processo que não exige complexidade, é ampla a existência no mercado de peças com baixíssima qualidade, provenientes de processos de remoção de umidade e queima sem o devido cuidado e controle, vindo a apresentar defeitos como fissuras e entortamentos, causando desperdícios e impactos ambientais (BRITO, 2016).

Tendo em vista que a maior parte das pesquisas reportadas pela literatura a respeito da secagem de tijolos além de serem em escala piloto, não utilizam modelos numéricos

tridimensionais considerando o meio externo, o presente trabalho se propõe a ocupar essa lacuna unindo a simulação tridimensional do tijolo com o desenvolvimento de um tijolo ecológico (CADÉ *et al.*, 2005, BATISTA *et al.*, 2008, *Idem*, 2009; MURUGESAN *et al.*, 2001; CHEMKHI, 2005).

Nesse sentido, o presente trabalho busca reproduzir a secagem de blocos cerâmicos maciços de forma numérica e experimental, comparando os resultados, de forma a demonstrar que o modelo matemático desenvolvido é confiável. Os resultados comparados por meio deste estudo, são os comportamentos mássicos e térmicos do tijolo através de suas curvas de cinéticas em tempos e temperaturas de secagens diferentes.

A validação do modelo proposto por meio do trabalho experimental de Nascimento (2002) visa aproximar a simulação numérica tridimensional com a realidade viabilizando o ambiente de pesquisa, onde a utilização da dinâmica computacional para a avaliação do processo de secagem se mostra uma fonte rica de possibilidades gráficas, fortalecida pela fácil visualização dos gráficos e imagens que os softwares de programação possibilitam.

Diante do exposto, a otimização do processo de produção industrial cerâmico se faz necessária para as produções industriais que se manterão no mercado, uma vez que algumas questões, que a presente pesquisa visa auxiliar, tem sido importante para a sobrevivência de negócios na atual concorrência do mercado, como: desperdício de insumos; produtos de baixa qualidade; redução do gasto energético; redução do custo de produção.

1.1 Objetivo geral

Determinar as difusividades mássicas/térmicas e a equação de Arrhenius para os processos de secagens do tijolo: através de modelo numérico tridimensional; e experimentalmente, utilizando um tijolo ecológico produzido com lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA).

1.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver a metodologia para a determinação dos coeficientes de difusividade mássico e térmico, de forma numérica e experimental.
- b) Validar o modelo numérico tridimensional transiente por meio dos resultados experimentais da secagem do tijolo de Nascimento (2002).
- c) Apresentar, por meio da simulação numérica, os comportamentos mássicos e térmicos através dos seus campos de gradientes e das suas curvas de cinéticas em tempos e temperaturas de secagens diferentes;
- d) Apresentar graficamente, por meio da simulação numérica, os comportamentos mássico e térmico da fase gasosa em contato e no entorno do bloco cerâmico/tijolo;
- e) Desenvolver um tijolo ecológico com o uso do lodo de ETA por meio de um processo sem emissão de CO₂, conciliando a questão da sustentabilidade para os setores da indústria cerâmica e do saneamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cerâmica vermelha

2.1.1 Utilização de materiais de origem cerâmica

O segmento da construção civil constitui-se em um setor de primordial importância para a economia e para a sociedade. A área de edificações possui uma enorme capacidade de absorção da produção civil do país, pois a esta área destina-se um dos principais insumos para o preenchimento de espaços em habitações em geral, como casas e apartamentos. O bloco cerâmico é, em sua totalidade, constituído de material argiloso, que no caso é um recurso natural não renovável e finito. Após a sua extração nas jazidas e de sua sinterização, o elemento cerâmico passa a existir e o recurso mineral não metal que compõe a argila não mais existe (SINDICER, 2022).

Constata-se que na área da construção civil ainda existem níveis altos de perdas de material cerâmico por diversos motivos, dentre eles as baixas propriedades dos insumos utilizados, que se deve, também, a um processamento de fabricação que possui um controle de qualidade comprometido. Assim, por ser um setor de intenso consumo dos recursos naturais, e também um grande gerador de resíduos sólidos, constitui-se uma grande ameaça ao meio ambiente (ARAÚJO, 2019).

Apesar de ser um setor bastante tradicional na história da vida social humana, o problema da perda de material da construção civil e a destinação que tem sido dada a mesma, ainda é um problema não solucionado pela sociedade civil, e que em geral produz grandes danos ambientais: assoreamento dos rios e a obstrução de galerias de drenagem de águas pluviais, comprometendo os já existentes problemas urbanos.

A cerâmica vermelha constitui um dos materiais cerâmicos mais utilizados pelo ser humano desde sua origem até os dias atuais. A partir do material argiloso, que é um recurso natural abundante na natureza, da qual se originam diversos produtos como blocos cerâmicos maciços, blocos cerâmicos vazados, telhas, pisos, louças, tubos e isoladores térmicos. Outra utilidade da argila é a sua utilização em aterros para habitações e construção de estradas e barragens (ABCERAM, 2022).

2.1.2 Histórico da cerâmica vermelha

Os materiais de origem cerâmica, que são utilizados desde 4.000 a.C. pelo homem, se destacam pela sua durabilidade, além da abundância de argila na natureza (principal matéria-prima deste tipo de material). Não se sabe exatamente a época e o local de origem do primeiro tijolo, entretanto os vestígios mais antigos de tijolos datam de, aproximadamente, 7500 a.C., onde foram encontrados tijolos nas localidades próximo à Anatólia, Turquia (ABCERAM, 2022).

A contar com informações recolhidas nestas e em outras descobertas arqueológicas, foi concluído que a técnica de cozimento de tijolos foi inventada há cerca de 3 000 anos antes de Cristo no Oriente Médio. Os tijolos foram uma inovação tecnológica importante, pois permitiram erguer estruturas resistentes à temperatura e à umidade, numa altura que proporcionou a transição do modo de vida nômade para o dependente de resistentes e duráveis.

A cerâmica vermelha é produzida por um ramo industrial cerâmico que produz peças com coloração avermelhada. A expressão cerâmica vermelha possui significado amplo, compreendendo aqueles materiais empregados na construção civil como: argila expandida, tijolos, blocos cerâmicos, elementos vazados, lajes, telhas, tubos cerâmicos afins (ABCERAM). Nesse segmento são relacionados os fabricantes e produtos destinados à construção civil.

Estima-se que mais de 6000 indústrias cerâmicas e olarias estejam espalhadas pelo Brasil, em sua maioria de micro, pequeno e médio portes, operando em vários níveis tecnológicos. Conforme Mecânica Industrial (2022), a cerâmica vermelha compreende todos os produtos feitos com matérias-primas argilosas, que após queima apresentam coloração avermelhada.

Esse ramo industrial por ser amplo e variado, destaca-se por possuir diversos segmentos. É de se esperar que setores específicos de produção, já estejam consolidados como é o caso dos materiais cerâmicos, de porcelana e azulejos. Entretanto, não diferente ocorre com outros ramos com traços de atividades primárias como segmentos que envolvem argila estrutural, e blocos refratários.

Como muitos dos produtos a exemplo do bloco cerâmico, não precisam possuir outras finalidades na obra além da missão de servir de alvenaria de preenchimento, muitos deles não precisam se enquadrar em propriedades rigorosas específicas relativas ao controle de qualidade, podendo facilmente ser alvo de tecnologias de baixo custo. O estudo sobre a formação geológica de cada argila é importante, pois pode predizer o prognóstico das

propriedades final da peça cerâmica acabada como: resistência após queima; plasticidade; encolhimento e condutividade termoelétrica (INDUSTRIAL, 2022).

2.1.3 O segmento produtivo da cerâmica no Brasil

No Brasil o setor de fabricação cerâmica conta com aproximadamente 6.900 empresas, sendo bastante pulverizado e composto principalmente de médias e microempresas. A renda do segmento tende a permanecer nos locais de produção, com impacto econômico e social significativo. Os principais produtos são tijolos, blocos de vedação e estruturais e outros materiais que compõem acima de 90% das alvenarias e coberturas utilizadas no País (ABCERAM, 2022).

Os brasileiros constituem um dos maiores produtores mundial do segmento cerâmico, ao lado da Espanha, Itália e China, consumindo sua produção por inteiro, sem significativas exportações e importações. Os produtos brasileiros gerados encontram-se distribuídos, em ordem de importância, nas regiões Sudeste, Sul e Nordeste. No nordeste, a produção está localizada principalmente nos Estados do Ceará, Bahia e Pernambuco, vindo em seguida Rio Grande do Norte, Maranhão e Piauí. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, a região Nordeste tem uma produção de aproximadamente 21% da nacional, mas consome cerca 22% (SINDICER, 2022).

O segmento de cerâmica vermelha está inserido no grupo das principais indústrias tradicionais da região Nordeste. Essa indústria se caracteriza como uma indústria “nativa” da Região, tendo uma estrutura de gestão marcadamente familiar, em especial nesse segmento. A presente indústria depende da exploração de jazidas com presença de grande número de microempresas, inclusive em condições informais, levando a falta de levantamentos regulares e precisos que possam mostrar a evolução dessas nesse setor para o Nordeste.

De um modo geral, as regiões Sudeste e Sul, são onde se concentram a maior quantidade de indústrias dos segmentos cerâmicos. Isto se dá devido à grande facilidade de insumos, energia, centros de pesquisas, universidades e alta demanda.

Devido ao crescimento e desenvolvimento do Nordeste na área de construção civil nos últimos 20 anos, aumentou-se a demanda de insumos e produtos do tipo cerâmico. A diversificação do setor industrial da cerâmica é bem distribuída, podendo ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha; materiais de revestimento; materiais refratários; louça sanitária; isoladores elétricos de porcelana; louça de mesa; cerâmica artística (decorativa e utilitária); cerâmica técnica; isolantes térmicos.

2.2 Argila

2.2.1 Definição

O termo argila é empregado para designar um material inorgânico natural, de granulometria fina, com partículas de 2 micrômetros, que geralmente apresenta comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água. Microestruturalmente são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, de origem terrosa e de textura fina. A cerâmica vermelha compreende todos os produtos feitos com matérias-primas argilosas, que após queima apresentam coloração avermelhada (MINEROPAR, 2000).

Sob a ótica sedimentalógica e granulométrica, a fração argila corresponde ao conjunto de partículas inferiores a 2 μm ou 4 μm (a depender da bibliografia consultada), segundo a medição de Attenberg e Wentwork, respectivamente (SANTOS, 1989). Segundo Santos (1989), argila é uma rocha finamente dividida, constituída essencialmente por argilominerais, podendo conter minerais que não são argilominerais, como: calcita, dolomita, gibsita, quartzo, aluminita, pirita, matéria orgânica e outras impurezas, que manifesta um comportamento plástico quando em interação com solução aquosa (SANCHEZ e BARBA, 1998).

O termo barro, popularmente usado para denominar as argilas, tecnicamente é o nome que se dá à argila impura. Dificilmente a Natureza vai apresentar argila pura, daí o uso indistinto da designação. O aparecimento destes minerais se origina da desagregação do feldspato das rochas ígneas por ação da água e do gás carbônico. Como existem rochas ígneas e feldspatos de diversos tipos, as argilas também apresentam características diversas.

Os argilominerais são os responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade que as argilas apresentam quando em contato com solução aquosa. Plasticidade é uma importante propriedade tecnológica que possibilita o emprego de diversas técnicas de conformação, permitindo a aquisição de formas geométricas variadas, com a resistência mecânica adequada para seu manuseio, razão pela qual ocorre o emprego de argilas em diversos segmentos cerâmicos como os de revestimento, cerâmica vermelha, cerâmica branca, refratários e outras (MOTTA *et al.*, 2007).

A plasticidade é perdida temporariamente pela secagem, e permanentemente pela queima, quando o produto adquire resistência mecânica (MINEROPAR, 2022). As argilas, podem ser de três tipos:

- Plásticas, chamadas argilas gordas, que são aquelas de alta plasticidade;

- Não-plásticas, chamadas de magras; e as de barranco;
- Originárias de uma formação geológica sedimentar.

Os dois primeiros tipos são encontrados normalmente em várzeas de rios, sendo transportados ou formados na localização em que são encontradas. Na maioria dos casos, encontram-se na mesma jazida argilas de diferentes tipos, sendo diferenciadas por meio de sua coloração (MINEROPAR, 2022). A figura a seguir retrata argilas com diferentes cores.

Figura 2.1 – Diferentes composições produzem argilas com diferentes cores.

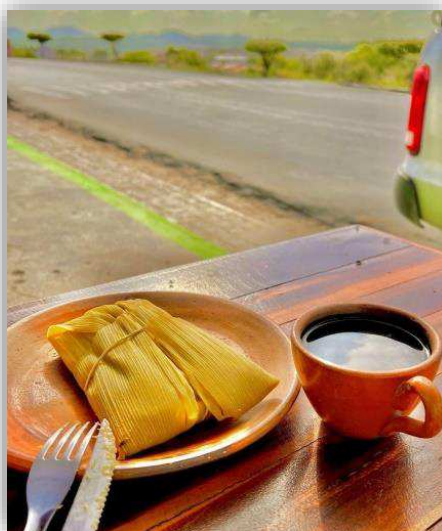


Fonte: acervo do autor, 2023.

Em Motta *et al.* (2007) a classificação ocorre em dois grandes grupos principais, com base na cor de queima (principal característica) e na mineralogia (característica secundária): argilas de queima avermelhada: matéria-prima para cerâmica vermelha e estrutural, placas cerâmicas de revestimentos (inclui principalmente os produtos da via seca e, secundariamente, pisos extrudados avermelhados e via úmida), agregado leve, vasos, pote e outras peças utilitárias e de decoração, de corpo avermelhado.

No segundo grupo, definido por Motta *et al.* (2007), argilas caulínicas de queima clara: (argilas plásticas e caulim para cerâmica branca), matérias-primas utilizadas em cerâmica sanitária, placas cerâmicas via úmida, porcelana técnica, porcelana e faiança utilitária e artística. A argila, por se tratar de um material extremamente fino, muitas vezes de mineralogia mista, torna-se difícil a sua identificação e classificação precisas, propiciando uma farta difusão de terminologia.

Figura 2.2 – Peças utilitárias de corpo avermelhado utilizadas rotineiramente em restaurantes da região do sertão alagoano.



Fonte: acervo do autor, 2023.

2.2.2 Composição das argilas

As pesquisas a respeito dos insumos argilosos empregados no segmento do setor cerâmico têm como meta a busca de informações que possam auxiliar no desenvolvimento de produtos e processos. O resultado poderá ser refletido através da obtenção de blocos cerâmicos e telhas de melhor qualidade, seja por mudanças nas formulações das misturas, seja por melhorias no processamento, através do controle das propriedades das matérias-primas (GRUN, 2005).

Conhecer uma argila e seus constituintes é de fundamental importância para o controle do processo de produção, pois a qualidade e a quantidade dos componentes afetam diretamente nas propriedades de cada argila. A caracterização física, química e mineralógica da massa argilosa é importante para determinação das suas propriedades, permitindo um melhor conhecimento da argila bruta empregada na confecção de produtos cerâmicos (BRITO, 2016).

A perfeição das peças cerâmicas está ligada principalmente às propriedades tecnológicas e mineralógicas das argilas empregadas, tais como: granulometria, plasticidade e composição mineralógica, entre outros fatores que contribuem na melhora das propriedades dos produtos finais, o que possibilita ao fabricante a flexibilidade, redução dos custos de produção, bem como um aumento do valor agregado dos seus produtos. Portanto, o

conhecimento das características das matérias-primas é de grande importância tecnológica e comercial para o desenvolvimento econômico da região.

O material argiloso é composto por partículas extremamente pequenas de certas substâncias chamadas de argilominerais. Existem relativamente poucas variedades de argilominerais, mas em grande abundância na Natureza. Dentre os argilominerais mais abundantes na natureza está a caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A caulinita dificilmente é encontrada pura na Natureza, sempre havendo alguma mistura.

Esta argila pura é um pó branco que quando seca é untuosa ao tato e quando úmida é muito plástica. O caulim é uma de suas ocorrências e serve como matéria prima de porcelanas, louças, azulejos e outros materiais. Tem coloração predominantemente branca para quanto maior for a composição caulinitica. Entre as impurezas encontradas na argila composta predominantemente de caulinita pode-se encontrar areia, sílica, alumina, óxido de ferro, álcalis, água, carvão e demais impurezas orgânicas.

A sílica livre, indispensável em alguma concentração por conta de sua facilidade de fundir-se e fornecer dureza, é considerada impureza expressa por meio de areia que ao diminuir a plasticidade e refratariedade do material argiloso, reduz não somente a resistência mecânica da cerâmica obtida, mas também a retração ou contração volumétrica, por conseguinte a deformação, aumentando a permeabilidade da peça que conseqüentemente torna-se seca com maior facilidade (KHALILI *et al.*, 2014).

A alumina além de reduzir a plasticidade e a resistência mecânica, reduz as deformações e faz baixar a temperatura de fusão da sílica para a formação do vidro. Os álcalis (cal, magnésia e sódio) também são fundentes e clareiam a cor das cerâmicas. O óxido de ferro ao misturar-se com a caulinita lhe confere a cor vermelha ou amarela. Em alguns casos forma pintas ou manchas, reduzindo a refratariedade, mas aumenta muito a dureza da cerâmica.

Os sais podem produzir eflorescências e criptoflorescência, que são defeitos apresentados por algumas cerâmicas. Estes compostos e muitos outros se encontram nas mais diversas proporções, pois as minas de argila ficam expostas por milhares de anos a todas as influências climáticas e ambientais. A inclusão de substâncias diversas é objeto de diversos estudos atuais.

Seja qual for o tipo e a origem do material argiloso, sabe-se que a qualidade da peça produzida é determinante, nesse sentido, deve-se evitar uma argila menos plástica, conhecida por “argila fraca ou magra”, por meio da adição de outra argila para homogeneização.

2.2.3 Propriedades das argilas

Argilas são materiais terrosos naturais, compostos de partículas coloidais de diâmetro inferior a 0,005 mm que misturados com solução aquosa adquirem a propriedade de apresentar alta plasticidade.

No preparo da massa utilizada para produção de peças cerâmicas de cor vermelha, busca-se plasticidade para propiciar trabalhabilidade e fusibilidade na queima objetivando proporcionar resistência mecânica nos produtos. A preparação da massa é feita, geralmente, por meio da mistura de uma argila gorda de alta plasticidade, granulometria fina e composição essencialmente de argilominerais com uma argila magra rica em quartzo e menos plástica, material redutor de plasticidade (BRITO, 2016).

Inicialmente, o material argiloso pode ser do tipo “magro” ou “gordo”, conforme menor ou maior quantidade de coloides. Os coloides são responsáveis pela plasticidade da argila, mas também, devido à alumina deformam-se muito mais no cozimento. Dependendo do local, estas argilas também podem ser conhecidas como argilas plásticas e argilas não-plásticas. Esta nomenclatura leva em conta exclusivamente a plasticidade medida empiricamente (ALBUQUERQUE, 2000).

As argilas possuem como características físicas mecânicas: granulometria, plasticidade, contração na secagem, resistência à flexão do material seco e do material queimado, temperatura de queima e retração na queima. Conhecer a argila significa conhecer essas características o que torna possível determinar o volume aquoso para a extrusão e a tendência a trincas na secagem. Tal conhecimento é de imprescindível necessidade na confecção de produtos com excelência.

2.2.4 Insumos: materiais fundentes

Fundentes são materiais com elevado teor de álcalis (K_2O e Na_2O) que, quando presentes em uma composição cerâmica, reduz o excesso de calor para a queima e porosidade da peça. Estas duas condições são importantes para peças cerâmicas de cor vermelha, de cor branca e materiais de revestimento (placas cerâmicas), em virtude de além de baixar o custo, reduzem a absorção aquosa aumentando a resistência mecânica.

Na fabricação de peças cerâmicas de cor vermelha somente a partir de argilas que queimam com cores avermelhadas, não há necessidade de se adicionar materiais fundentes, uma vez que as argilas empregadas contêm álcalis. Sem embargo, em cerâmicas de cor branca

e de muitos produtos de revestimento (placas cerâmicas) que, por serem produtos mais elaborados que devem apresentar características determinadas, na composição da massa, junto às várias matérias-primas utilizadas, em geral refratárias, adicionam-se materiais fundentes.

No Brasil, o feldspato e o filito, descritos anteriormente, são os fundentes mais tradicionais; no entanto, recentemente tem-se feito o uso de fonolito e alguns tipos de rochas potássicas. Estas matérias-primas têm uma ação fundente mais enérgica que o feldspato e que o filito, em razão de pouca concentração de sílica e elevado teor de álcalis. A sericita existente no Paraná, muitas vezes comercializada como filito, também está sendo utilizada para este fim, pelo seu elevado teor de potássio.

2.3 Bloco cerâmico

O bloco cerâmico pode ser considerado uma pedra artificial obtida por meio da massa cerâmica através de um processo industrial que tem como insumo as misturas argilosas. As massas cerâmicas tradicionais são denominadas mediante características particulares, tais como cor, textura e conformação (CORREIA, 2004).

Segundo Grun (2005), na fabricação de blocos cerâmicos em pequenas olarias o processo é composto pelas seguintes etapas: coleta de material argiloso; estocagem a céu aberto e/ou em local coberto, para épocas de chuva, evitando assim o excesso de umidade; desagregação; mistura de no máximo duas argilas; regulagem da concentração aquosa; conformação por extrusão; secagem natural; e queima em fornos intermitentes, abaixo de 1000°C, após a queima, os blocos são resfriados lentamente para evitar rachaduras. Em seguida, podem passar por processos de acabamento, como lixamento para remover imperfeições e dar um acabamento mais suave.

A conformação compreende as etapas de extrusão e corte, assim, as peças então seguem para a etapa de tratamento térmico que envolve secagem e sinterização.

2.3.1 Processo de produção da cerâmica

Antes de iniciar a produção da jazida de argila, é necessário um estudo completo das características e do volume disponível de material argiloso a ser retirado. Esta etapa recebe o nome de exploração, na qual são analisadas a composição por meio do teor do material argiloso, a pureza, as características físicas na secagem e cozimento da peça.

O estudo do material argiloso que será submetido ao tratamento térmico se faz importante, pois é um excelente indicativo das propriedades dos produtos obtidos, bem como das necessidades das correções a serem feitas.

O valor comercial da jazida é estimado principalmente em virtude da quantidade e composição do material disponível. São levadas em consideração as facilidades de acesso à jazida, sua localização, transporte e se há água disponível nas proximidades. Assim, os insumos são transportados das jazidas para os galpões de armazenamento.

Figura 2.3 – Jazida de produção de material argiloso no município de Água Branca (AL).



Fonte: Acervo do autor, 2023.

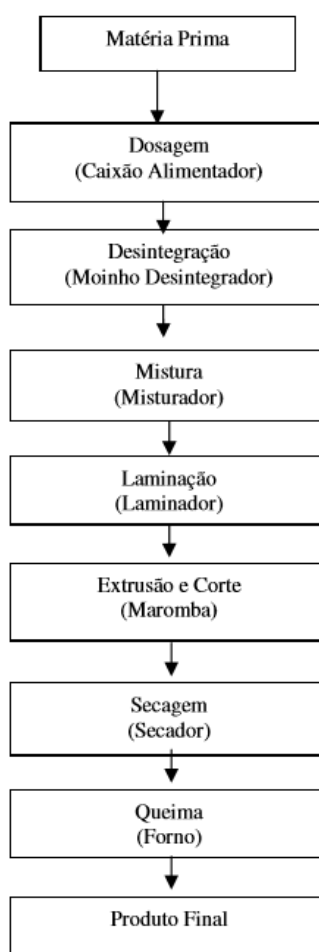
Para estocagem, chamada de descanso ou sazonalidade, algumas cerâmicas possuem depósitos próprios de argilas, enquanto outras adquirem de terceiros. Nesta fase, o material argiloso é submetido a processos de modificações de natureza químicas e descompactação, melhorando a qualidade do material e garantindo o estoque para períodos de maior pluviometria.

Em conformidade com os autores clássicos desta área Guilherme (1998) e Bauer (1994), a fabricação das peças cerâmicas compreende diversas etapas que podem ser

enquadradas em duas fases: o tratamento prévio do material argiloso e o tratamento térmico da peça argilosa. Entretanto, antes, existem duas etapas imprescindíveis a este processo: a exploração e produção das jazidas.

A figura a seguir retrata o processo de produção da cerâmica vermelha que tem como matéria-prima a argila. Esse processo é comumente repetido por todas as empresas de produção cerâmica em geral, havendo pequenas variações, em conformidade com particularidades de cada material argiloso ou produto a ser obtido (WITTWER E FARIA, 1997; MAFRA, 1999).

Figura 2.4 – Fluxograma de produção de blocos cerâmicos.



Fonte: Villar (1988), Secteme (1990), Cavaliere *et al.* (1997), Steil (2000).

2.3.2 Pré-tratamento da matéria-prima

Em conformidade com Guilherme (1998) e Bauer (1994), o tratamento prévio compreende os seguintes passos: estocagem, dosagem, desintegração, homogeneização ou mistura, laminação, extrusão, corte e prensagem. Para cada etapa desta uma explicação foi destinada, a seguir.

2.3.2.1 *Dosagem*

A etapa de dosagem consiste em abastecer a fábrica com as matérias primas, respeitando as devidas proporções, basicamente é feita por volume de material ou por peso caso necessite-se de maior precisão.

Na etapa de dosagem, a matéria-prima é transportada para o caixão alimentador dosador ou diretamente a correias transportadoras, cujas matérias-primas são proporcionalmente dosadas, dependendo de suas características cerâmicas.

Quando ocorre a utilização de mais de um material argiloso processamento, existe a necessidade da pré-mistura.

2.3.2.2 *Desintegração*

A argila ao sair do caixão alimentador é conduzida ao desintegrador, nesta fase esta parte da produção é de suma importância já que a argila se encontra na natureza com baixa porcentagem de umidade, endurecida e com torrões compactos e muito resistentes à ação homogeneizadora normal da argila.

Portanto, neste momento a argila começa a sofrer sua primeira etapa de transformação, isto é, no desintegrador são separados os pequenos corpos estranhos eventualmente contidos na argila como também é executada uma pré-laminação em se considerando que a passagem mínima entre os cilindros é de apenas 2 a 3 mm.

2.3.2.3 *Homogeneização ou Mistura*

O material argiloso é submetido à ação de moinhos para a trituração, onde o material suficientemente fino é separado por peneiras a depender de sua granulometria, sendo as

partículas mais duras e grossas retidas por peneiramento. Na etapa de mistura é utilizado um misturador que apresenta facas e martelos intercalados girando em sentidos opostos que diminuem ainda mais o tamanho dos torrões. Se necessário, para um melhor tratamento, pode ser adicionado água à mistura.

O material aproveitado é misturado em máquinas amassadoras-misturadoras, onde se obtém a concentração aquosa almejada por meio da adição de água. Nestas máquinas, o equipamento misturador, mediante movimentos circulares, permite a homogeneização da massa cerâmica e introduz água para a atingir a umidade (geralmente de 18 à 30%) e plasticidade adequada para extrusão.

A argila e os não-plásticos devem misturar-se o mais intimamente possível e com precisa concentração aquosa para facilitar a homogeneização. Muitos defeitos que se manifestam à saída do secador têm sua origem em etapas anteriores ao processo de fabricação, independentemente da secagem. Assim uma homogeneização incorreta da pasta origina retrações locais diferenciais (mais contração onde há mais umidade) que se traduzem em fissuras. Estas são bastante frequentes em produção artesanal.

2.3.2.4 *Laminação*

Na laminação a argila passa por um laminador, que completa a mistura, sendo responsável por um adensamento capaz de eliminar bolhas de ar ou aglomerados da argila para que ela possa ser levada às extrusoras, as quais podem ter um laminador acoplado na entrada do equipamento (VILLAR, 1988).

Dessa forma, a desintegração da argila é auxiliada pelas velocidades diferentes de rolos laminadores, e os grãos de pedras calcárias, os corantes ferruginosos, pedriscos e impurezas, que porventura estiverem presentes, são reduzidos a pó, misturando-se à massa, completando a homogeneização (BAUER, 1994).

2.3.2.5 *Extrusão*

A extrusão, realizada na extrusora, é o passo responsável por fornecer forma ao produto, onde a massa rígida (umidade entre 18 e 24%) é impulsionada, com o auxílio de um parafuso de rosca sem fim, visando o atravessamento de espaços numa chapa de aço na qual existe um outro parafuso de rosca sem fim para extrair a massa plástica de argila mediante a

passagem por uma boquilha, atendendo a forma da peça cerâmica desejada (Figura 2.8). A máquina utilizada é uma extrusora de vácuo também conhecida como “maromba”.

É nesta etapa que se inicia a conformação mecânica da peça cerâmica, a qual consiste na obtenção de produtos com dimensões e formas pré-determinadas.

2.3.2.6 Corte

Corte é processo pelo qual o bloco do material extrudado contínuo é cortado nas dimensões padronizadas mediante o uso de uma cortadeira, manual ou automática que se localiza logo após a extrusora. A cortadeira operando em sincronia com o deslocamento do bloco em extrusão obtendo-se produtos como tijolo, lajota, tubo cerâmico e outros produtos de forma regular (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

Essa etapa constitui uma continuidade do estágio de conformação mecânica que depende essencialmente de produto que se pretende obter e da plasticidade do material argiloso que se tem à disposição.

Após o corte pode haver ou não a etapa de prensagem, que tem o objetivo de dar forma ao produto conferindo-lhe dureza e resistência para que o mesmo tenha possibilidade de atravessar o processo produtivo sem que possa ser danificado.

Além de conferir resistência, pode permitir um padrão uniforme de dimensão e propriedades de valor: porosidade, distribuição de tamanho de poros e tamanho de partículas. Essas propriedades afetarão diretamente na capacidade de reabsorção de umidade e resistência mecânica da peça.

2.3.3 Tratamento térmico do material argiloso

A etapa de tratamento térmico é composta de operações como a remoção de umidade (secagem) e a queima, é nesta última onde há as transformações de microestrutura, conhecida como sinterização. Dessa forma, características a seguir são determinantes na qualidade final do produto: brilho, porosidade, resistência termomecânica, resistência química, e cor (PAULETI, 2001).

2.3.3.1 A secagem

Após o corte, as peças úmidas são transportadas para os secadores artificiais, onde são empilhadas em blocos. A secagem é o passo do processo que antecede a queima, e que demanda uma quantidade energética apreciável para fornecer impulsão a difusão mássica gradual e uniforme da umidade. O objetivo desta etapa é a redução da concentração de umidade da peça dos 20% para menos de 10% após a secagem, ocorrendo uma contração de 4 à 10% do volume da peça.

É durante a secagem que ocorre a maior remoção de aquosa do material argiloso, ocorrendo por meio da transferência mássica através dos poros para o ambiente circundante.

A secagem é realizada em galpão ou estufa, sendo o galpão, o local mais utilizado pelas olarias. Após a secagem, o produto deve ter resistência suficiente para possibilitar a manipulação que exige o acabamento e a destinação até a queima do corpo cerâmico (SOARES *et al.*, 2004). As perdas nesse tipo de processo constituem cerca de 5% do volume total de peças.

Existe uma forma de secar o material argiloso úmido sob telheiros, chamada de secagem natural. Essa forma exige grandes áreas e normalmente é utilizada por olarias para a fabricação de bloco cerâmico vazado, sendo este processo lento, pois está submetido ao calor do ambiente.

2.3.3.2 Queimagem ou sinterização

A sinterização é o passo mais importante do processo cerâmico, pois é nela que a peça adquire as propriedades de uso. As peças são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas, entre 800 °C a 1000 °C. Assim, a alta temperatura produz alterações microestruturais na massa cerâmica, alterando as propriedades e provocando o surgimento de estruturas de cristais não antes existentes mediante a fusão de grãos (soldagem).

A resistência termomecânica, a contração e retração volumétrica, a absorção e reabsorção e a porosidade são propriedades que também são dependentes do controle da queima. Este processo consiste em três etapas básicas: desidratação, oxidação e vitrificação. A depender do material cerâmico a ser produzido pode não ser necessário a ocorrência da realização dessas três etapas. Entretanto foram dedicadas algumas linhas sobre essas três etapas nos próximos parágrafos.

A desidratação é provocada pelo efeito do calor que consiste na perda de água por capilaridade, quando a argila é aquecida até 150°C. Após os 150°C até 600°C, ela perde a água de plasticidade, ou seja, endurece, mas continua sendo argila. Até este ponto não há alteração nas características químicas, pois se a mesma for hidratada, o material ainda possui a habilidade de retomar os níveis de plasticidade iniciais. Ou seja, dá-se o nome de desidratação à etapa em que ocorre a vaporização da água localizada nos poros.

Na primeira fase das alterações químicas após os 600 °C ocorre a remoção da água de constituição do argilomineral. É nesta etapa que o argilomineral alterado apresenta um endurecimento permanente. Em seguida ocorre a carbonização dos resíduos orgânicos existentes, assim como sua oxidação, que consiste no processo onde os carbonetos são calcinados e oxidam-se em temperaturas próximas de 900 °C. A oxidação tem por objetivo, também, a transformação do óxido ferroso em férrico, proporcionando em muitas das vezes a coloração avermelhada à argila.

Por fim, acima de 950 °C ocorre a vitrificação, aparecendo então a cerâmica, difícil de desagregar deformar ou quebrar. É na vitrificação que ocorre a contração e o fechamento dos poros da argila por meio da sinterização. Ocorre quando as peças cerâmicas são submetidas a temperaturas próximas de 1.200 °C. Nessa etapa toda matéria combustível é consumida, sendo o carvão e o enxofre eliminados.

Embora o controle durante desta etapa seja fundamental para reduzir as perdas e obter um produto final de qualidade, poucas empresas o realizam, acarretando perdas da ordem de 3% na produção.

2.3.4 Expedicionamento

O expedicionamento é o último passo da fabricação, podendo ser dividido em inspeção, armazenamento e distribuição. A Inspeção constitui um procedimento do setor de controle da qualidade da empresa, sendo realizada entre a produção e o armazenamento, tem como finalidade o descarte de peças com defeitos.

O armazenamento é realizado em local adequado que pode ser coberto ou não, onde o material aguarda o transporte para definitivamente ser expedido (Figura 2.10). A distribuição da mercadoria é efetuada por veículos próprios ou frentistas (VILLAR, 1988).

Muitos defeitos que se manifestam à saída do secador podem ter sua origem tanto em etapas do tratamento prévio como nas etapas do tratamento térmico (OLIVEIRA *et al.*, 2005). Dessa forma, as etapas de secagem e queimagem, podem servir de indicadores operacionais

de falhas em etapas anteriores. A saber, uma homogeneização não uniforme da pasta produz locais com mais umidade originando contrações e não uniformes e retrações locais diferenciais, resultando em fissuras.

- São considerados defeitos os empenamentos, trincas e manchas resultantes de excessos de temperaturas. Alguns defeitos em tijolos Segundo Oliveira *et al.* (2005): Eflorescência: sobre as superfícies externas dos tijolos formam-se depósitos de sais que apresentam cores e manchas indesejáveis. A absorção de umidade provoca a dissolução dos sais, que podem ser precipitados por meio da evaporação da água.
- Coração negro: chama-se coração negro a fenômeno do aparecimento de manchas negras e cinzas no decorrer da secção transversal das peças. Essas manchas atravessam o interior da peça e são detectadas após a queimagem.
- Empenamentos: são provocados por secagem diferencial, por mau posicionamento no suporte de secagem, má distribuição e disposição das peças, ou ainda, por boquilhas da fiação. A secagem diferencial ocorre se uma face da peça seca mais rapidamente que a outra, formando-se gradientes de tensões residuais de contração, que podem deformar o produto. As boquilhas de fiação ocorrem quando este tipo de empenamentos se nota após a secagem. Altas temperatura e velocidade do ar podem causar estes defeitos (OLIVEIRA *et al.*, 2005).
- Trincas: as trincas de secagem são pequenas fissuras causadas por secagem rápida. Esses tipos de trincas se iniciam nas bordas e propagam-se até o centro da peça, sendo mais aberta na borda. As trincas de queima podem ser de aquecimento ou resfriamento: as trincas de aquecimento caracterizam-se por serem pouco sinuosas, abertas e de bordas dentadas, enquanto as de resfriamento caracterizam-se por serem muito finas de bordas fechadas, normalmente em forma de S (SANCHEZ E BARBA, 1998).
- Laminações: são microfissuras que produzem as boquilhas das extrusoras. Para reduzir este problema é aconselhável introduzir um redutor de plasticidade na pasta ou então modificar o formato do molde para dar uma maior rugosidade. Um defeito associado é a presença de vazios. Se existe ar incorporado, a orientação preferencial resultante da extrusão funciona como um selante, podendo resultar no inchamento do material (SANCHEZ E BARBA, 1998).
- Readsorção de umidade: esse fenômeno ocorre por conta do grande intervalo tempo transcorrido entre a etapa de secagem e queimagem. A umidade ambiente pode ser readsorvida pela peça, iniciando-se uma re-hidratação (readsorção) que causa rupturas e/ou explosões, dentro do forno (ELIAS, 1995).

2.4 Secagem

2.4.1 Remoção de umidade dos argilominerais

O conhecimento dos tipos de água presentes nos argilominerais é importante, pois determinadas propriedades como plasticidade, resistências termomecânicas (a úmido e a seco) e retrações/contrações (linear e volumétrica) são fortemente alteradas pela adição de umidade nos argilominerais. Nesse sentido para um melhor entendimento da secagem dos materiais cerâmicos, são descritos abaixo a classificação das ligações de água, geralmente contidos no interior dos argilominerais (SANTOS, 1989):

- Água não-combinada: é a água que não possui interação química detectável com as partículas dos argilominerais, não compõem a estrutura dos minerais e não formam íons hidroxilas. Neste contexto, pode ser chamada de água livre, água em excesso presente no substrato sólido, caracterizada como água de poros;
- Água combinada: é a água que possui interações químicas com partículas de argilominerais, entretanto pode ser eliminada até temperaturas da ordem de 110 °C (SANTOS, 1989);
- Água coordenada: é a água associada aos cátions presentes na massa cerâmica existindo interação entre os cátions e as moléculas de água, por exemplo, um cátion trivalente Al_3^+ forma íons hidratados $[Al(OH_2)_6]_3^+$ com seis moléculas de água, ou seja, com número de coordenação seis;
- Água adsorvida: é a água ligada à superfície externa e em volta das arestas das partículas dos argilominerais, devido a interações físico-químicas intermoleculares;
- Água zeolítica: é a água presente nos canais tubulares existentes entre as unidades estruturais fibrilares das redes cristalinas dos argilominerais sepiolita-paligorsquita, sendo uma água intercalada, muito específica. Segundo Santos (1989), não é comum existência desses argilominerais em matérias primas cerâmicas.
- Água de constituição ou reticular: é a água presente na rede cristalina dos minerais de argila (íons hidroxila).

Assim, a água presente nas etapas de conformação deve então ser eliminadas gradualmente antes da queimagem, impedindo fraturas e trincas nas peças (FERNANDES, 1998).

Ao adicionar-se água na argila no processo, cada partícula que constitui o pó cerâmico é envolvida por uma película de moléculas de H₂O, assim os materiais constituídos de partículas finas e que possuem maior superfície específica, precisam ser preparados com mais solução aquosa, o que possibilita altos índices de retração linear e volumétrica, provocando o aparecimento de microfissuras e empenamentos, contribuindo para a perda de qualidade da peça final.

As argilas muito maleáveis perdem na secagem de 5 a 8% do seu volume, os argilominerais menos maleáveis perto de 3 a 5%, e as argilas com baixo teor de material argiloso, ainda menos, tudo depende, portanto do tamanho do grão da argila. A esmectita, uma argila muito maleável, de grão muito fino (baixa produtividade), que é geralmente utilizada em pequena percentagem para conferir uma maior maleabilidade a outras massas cerâmicas, chega a perder na secagem de 10 a 15% do seu volume quando posta para secar. Se acrescentarmos a esta, uma perda adicional sofrida durante a queimagem, a esmectita chega a perder de 40 a 50% do seu volume. Segundo Santos (1989), o teor de umidade final de uma argila seca a 110°C, se situa entre 5 a 10%.

Por último, vale a pena fazer uma referência ao problema da reabsorção de umidade. Dependendo do material argiloso, se o tempo transcorrido desde que a argila deixa o secador até quando ela é introduzida no forno, é muito dilatado, e a umidade ambiente é muito alta, inicia-se a re-hidratação, que nada mais é que a reabsorção das moléculas de água que retornam para dentro da peça, podendo provocar rupturas ou explosões, quando a mesma é reaquecida no forno (ELIAS, 1995).

Do exposto, pode-se dizer que, quanto maior é a perda de massa e diminuição de volume durante a secagem, maior é também a tensão delas resultante, e no caso da secagem ser demasiadamente rápida, pode ocorrer o aparecimento de trincas e fraturas.

2.4.2 Difusão mássica e térmica em materiais cerâmicos

A secagem pode ser influenciada por condições internas e externas, bem como pelo mecanismo de migração mássica no interior da peça. Neste sentido, alguns autores, tais como Elias (1995), Fricke (1981) e Hasatani *et al.* (1992) estão em concordância ao defender que na secagem de argilomineral, o mecanismo de migração de umidade dominante é o transporte por difusão líquida.

No entanto outros pesquisadores, van der Zanden *et al.* (1996, 1997) consideram que o mecanismo dominante é o transporte por difusão de líquido e vapor. Estes autores usaram

em seus trabalhos uma modelagem numérica que considera a migração de líquido e vapor, resultando num bom ajuste dos dados empíricos/teóricos. Eles afirmaram que a migração molecular aquosa nas argilas é dominada pelo transporte de líquido, e para pequenas concentrações aquosa, o fluxo difusivo de vapor tem significativa contribuição.

Hasatani e Itaya (1992) desenvolveram uma metodologia numérica para representar o fluxo difusivo mássico e calorífico em argilosas com forma de paralelepípedo, considerando condições iniciais convectivas nas camadas limites da superfície sólida. Eles usaram a teoria da difusão líquida, aplicada a um problema tridimensional transiente, considerando coeficiente difusivo variável e o encolhimento do sólido durante a secagem.

Em Hasatani e Itaya (1992), não somente os números experimentais e numéricos demonstram uma boa coerência, mas os efeitos do transporte de calor no processo de deformação da peça também foram analisados, evidenciando um aumento sensível na deformação do material durante a sua desidratação. É reportado também, que existem maiores níveis de tensões trativas nas camadas superficiais do produto, sobretudo nas extremidades do paralelepípedo estudado.

Itaya *et al.* (1997) se debruçaram sobre a desidratação da massa cerâmica e argilosa, usando a teoria da difusão líquida, num estudo numérico tridimensional transiente. Os efeitos dos parâmetros adimensionais como os números de Biot e de Lewis, foram analisados visando a obtenção de uma secagem otimizada. Eles evidenciaram que os diferenciais de concentração de umidade e as máximas tensões que geram trincas no material são mais significativos com os acréscimos destes parâmetros. Evidenciaram também o aumento nas tensões termomecânicas a medida que se eleva o número adimensional de Biot.

Keteraars *et al.* (1992) desenvolveram um estudo numérico uni e bidimensional, aspirando a análise da influência do encolhimento na cinética de secagem e tensões internas, em um material cerâmico argiloso. Assumiram diferentes tipos de considerações: encolhimento unidirecional, encolhimento isotrópico e sem encolhimento. Averiguou-se, não somente uma velocidade de desidratação influenciada pelo tipo de encolhimento, sendo maior para um encolhimento unidimensional, mas também tensões que podem provocar trincas e deformações, as quais crescem com a elevação dos níveis de encolhimento.

Keteraars *et al.* (1992) ao criarem uma metodologia numérica, fundamentada na teoria da difusão líquida, para analisar o fluxo mássico difusivo em materiais cerâmicos argilosos em processos de desidratação, aspiraram avaliar as consequências nesse processo por meio da alteração nos valores do coeficiente mássico difusivo. Os resultados demonstram um decréscimo deste coeficiente no decorrer do processo de desidratação.

Su (1997), baseando-se na termodinâmica do não-equilíbrio, nas leis macroscópicas de conservação, nas relações de equilíbrio de líquido e vapor e assumindo um sistema poroso isotrópico, desenvolveu um sistema equacional não-linear com valores iniciais relativos a convecção na camada limite objetivando representar a difusão mássica e calorífica no decorrer do processo de desidratação de blocos cerâmicos.

Su (1997) alcançou algumas conclusões, são elas:

- Na transição do 1º para o 2º estágio de taxa decrescente, acontece uma relativa elevação da temperatura;
- No 2º estágio taxa decrescente, o mecanismo dominante do fluxo mássico de água consiste na evaporação-condensação;
- A porosidade decresce devido à expansão térmica e alteram-se também as propriedades elásticas do material.
- Os efeitos da porosidade foram significativos na pressão do poro, no campo de umidade e na distribuição de tensões.
- As máximas tensões trativas ocorreram nas camadas superficiais dos materiais, sendo essas responsáveis pelo surgimento de trincas superficiais.

As propriedades tais como porosidade e sensibilidade, alvo de bastante estudo por Su (1997), também foram bastante estudadas por Krause (1997), que as enfatizou como parâmetros extremamente importantes no estudo da operação de secagem, tão quanto como a natureza do material argiloso, umidade do ar, temperatura e geometria do produto.

As experiências de secagem com argilas, citadas por Medeiros (1977), indicam que as peças de argila com fina granulometria e na temperatura ambiente, possui evaporação praticamente somente na superfície da peça. Neste contexto, a teoria de difusão líquida parece estar em conformidade com diversos textos presentes na literatura como apresentado no presente subtópico que aqui encerra.

De acordo com Krause (1977), existem outros parâmetros importantes no processo de secagem além da velocidade, temperatura, umidade relativa do ar de secagem, natureza do material cerâmico e geometria do produto, tais como porosidade e sensibilidade.

2.4.3 Propriedades cerâmicas afetadas pela secagem

2.4.3.1 Porosidade e contração volumétrica

Os elementos definidores de como se dará a secagem dependem do argilomineral presente e de seu estado de interação no meio ao qual se encontra. Comparando duas argilas de mesma mineralogia, contrairá mais a argila que tiver um tamanho de grão menor. Isto é necessariamente assim porque uma maior trituração determina uma maior superfície específica e uma capacidade de adsorção de água maior (ELIAS, 1995).

Paralelamente, uma distribuição granulométrica menor e uniforme indica uma matéria com menor capacidade de facilitar a percolação dificultando a secagem. Quanto a esta propriedade, é necessária uma combinação de poros grandes, médios e pequenos objetivando a desidratação.

Se a argila apresenta problemas para secar devido a excesso de umidade, tem-se como alternativa recorrer à ação de redutores de plasticidade. Estes são sólidos inertes, nos quais a maioria das vezes seguem inertes durante a queima, que se misturam com as argilas para manter os caminhos de saída da água. O incremento de um redutor de plasticidade a uma argila aumenta a condutibilidade capilar e as velocidades de secagem são mais elevadas.

Maiores quantidades de grãos finos e menores quantidades de grãos médios, favorecerão um empacotamento denso (menor porosidade) e uma resistência mecânica mais elevada, no entanto absorvem mais água, e encolhem muito mais que as de maior porosidade. Portanto massas que exijam grandes quantidades de água devem ter uma secagem controlada, para evitar trincas, devido ao excessivo encolhimento (FERNANDES, 1998).

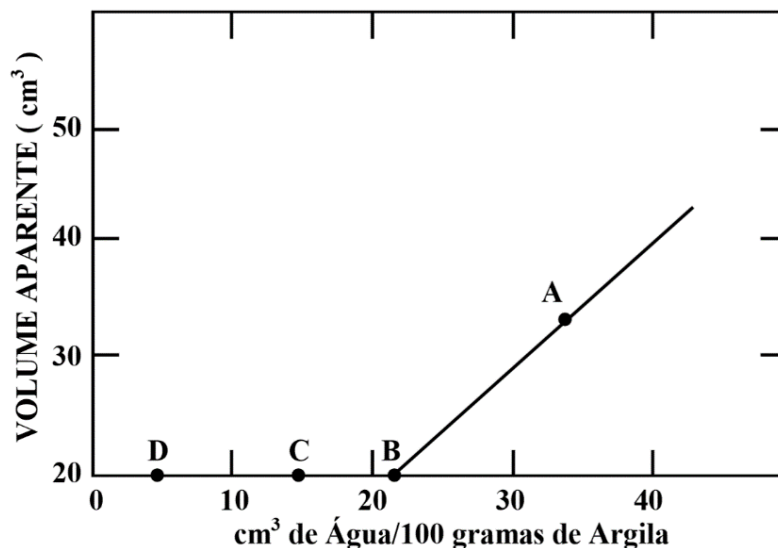
É fato que a contração, muitas vezes é decisória para que aconteça a desmoldagem posterior à secagem, no entanto contrações excessivas, rápidas e desuniformes, provocarão trincas e fraturas (ALBUQUERQUE, 2000).

Para produtos extrudados e moldados, o encolhimento é linear para contrações perto de 1,5% a 4% (REEDS, 1991). A contração também depende da geometria do corpo sólido, isto é, da relação área/volume. Quanto maior a relação entre a superfície e o volume do corpo, mais rapidamente o sólido irá secar.

A contração é menor na direção paralela à força de moldagem (extrusão, prensagem), e maior na direção perpendicular a ela (FERNANDES, 1998). Em conformidade com o gráfico da figura a seguir, tem-se uma peça que diminui de volume de forma constante (BOUCKAERT, 1992), do ponto A até o ponto B (ponto de umidade crítica), deste ponto em diante não ocorrerá mais diminuição de volume, continuando apenas a perda de massa, assim,

a partir deste ponto a desidratação há a possibilidade acelerada sem causar danos a peça. Estes valores dependem da natureza do material argiloso que está sendo submetido à secagem.

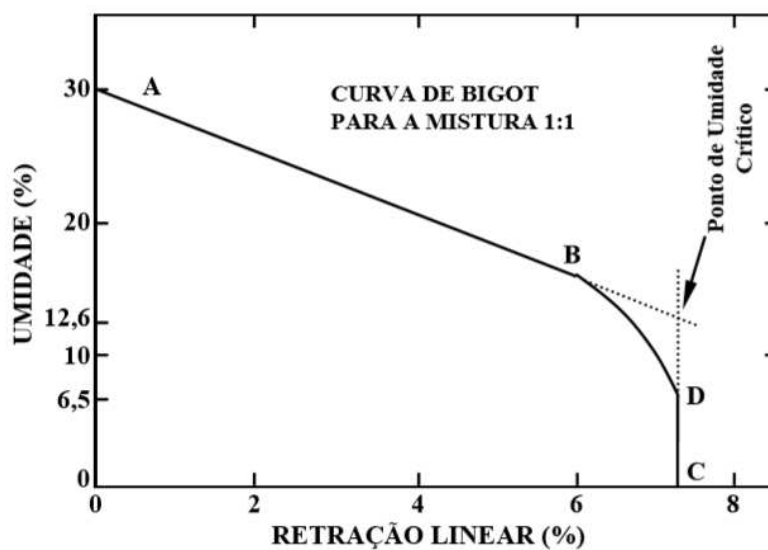
Figura 2.5 – Variação do volume aparente na peça com relação ao seu volume de água.



Fonte: Elias (1995).

A próxima figura relaciona a evolução da contração, na forma de retração linear, com a diminuição da quantidade de água. Conhecida como curva de Bigot, ela apresenta a contração que pode chegar a valores perto de 8%.

Figura 2.6: Determinação do ponto de umidade crítica.



Fonte: Elias (1995).

O ponto de umidade crítica, não é perfeitamente definido para todo material argiloso, apesar disso, quanto mais plástica a argila, maior a contração e maior o risco de que se produzam tensões que originem fissuras de secagem.

Outros fatores são devidos diretamente à fase de secagem, são eles: a má colocação da peça no secador, ou a má aplicação dos vetores de secagem (ocasionando elevação excessiva da temperatura e alta velocidade de ar).

2.4.3.2 Permeabilidade e sensibilidade à secagem

Conforme Elias (1995), a sensibilidade à secagem (S_s), se define como o risco de aparecimento de fissuras nessa operação. Matematicamente se expressa pela equação:

$$S_s = \frac{\text{Contração durante a secagem (\%)}}{\text{Tempo de aparecimento da primeira fissura (min)}} \quad (2.1)$$

A sensibilidade é diminuída adicionando-se determinadas matérias primas. Essas, separadas por grupos, funcionam cada uma delas com um princípio físico diferente. Exemplificando, o quartzo, feldspato ou similares, reduzem a sensibilidade.

Para o grês cerâmico, é preferível o feldspato porque a transformação alotrópica do quartzo pode provocar rupturas durante o resfriamento. Já o hidróxido de cálcio e similares, possuem ação coagulante, formando macro agrupações de partículas. Estes materiais reduzem a microcapilaridade e facilitam a secagem. Certas matérias orgânicas como o papel de jornal, serragem e lodos aplicados em quantidades moderadas, exercem uma ação de ancoragem das partículas argilosas e, portanto, facilitam a migração de água (KNARUD *et al.*, 2020).

As Tab. 2.1 e Tab. 2.2 mostra a sensibilidade de diversas argilas. A parte inferior detalha os limites de susceptibilidade. Assim, valores de $S_s > 2$ corresponde a materiais com maior sensibilidade ao transporte de umidade e $S_s < 0,2$ a materiais que não apresentam nenhum problema. Em geral as argilas que contém montmorilonita-ilita (muito plásticas) serão difíceis de secar, enquanto as arenosas (pouco ou nada plásticas) não terão problema.

Tabela 2.1: Sensibilidade de argilas cerâmicas

ARGILA	SENSIBILIDADE (S_s)
Bentonita-Ca	5,07
Montmorillonita-illita (limo)	3,50
Limo argiloso	2,41
Argila illítica	0,88
Limo arenoso	0,84
Esquisto betuminosa	0,84
Argila de opalina (sílice amorfo)	0,71
Argila illítica-sericítica	0,67
Argila calcárea	0,53
Argila esquistosa	0,45
Argila sericítica	0,36
Caolín	0,25
Fireclay	0,25
Limo arenoso	0,13
Argila muito arenosa	0,06

Fonte: Elias, 1995.

Tabela 2.2: Sensibilidade e grau de sensibilidade

SENSIBILIDADE (S_s)	GRAU DE SENSIBILIDADE
>2,00	Altíssima susceptibilidade
2,0 a 1,4	Susceptibilidade muito alta
1,4 a 0,9	Susceptibilidade alta
0,9 a 0,5	Susceptível
0,5 a 0,2	Pouco susceptível
<0,2	Nada susceptível

Fonte: Elias, 1995.

2.4.4 Propriedades das argilas

2.4.4.1 Plasticidade

É a propriedade do corpo que, submetido a uma força determinada, deforma-se e conserva indefinidamente a deformação quando se anula a força, característica de um fluido não-newtoniano. A argila seca tem plasticidade nula dado que não se classifica como um fluido. À medida que é misturada à água, sua plasticidade torna-se significativa (KNARUD *et al.*, 2020).

2.4.4.2 Limites de atherberg

Em conformidade com a mecânica dos solos, a trabalhabilidade de uma argila é normalmente avaliada pelos limites de Atherberg que consiste no limite de plasticidade e limite de liquidez. Definindo-se a relação entre o limite de plasticidade (LP) e o limite de liquidez (LL), temo que o índice de plasticidade (IP) é definido por:

$$IP = LL - LP \quad (2.1)$$

e o índice de consistência por,

$$IC = [LL-M] / IP = [LLM]/(LL-LP) \quad (2.2)$$

onde M é o teor de umidade da argila no estado proveniente da jazida.

Em conformidade com ABNT o material argiloso classifica-se como mostrado na Tabela 2.3, abaixo.

Tabela 2.3: Classificação das argilas segundo ABNT, índices de consistência e indicações.

Tipos de argilas	Índices de consistência	Indicações
Muito mole	$IC < 0$	Corre com facilidade entre os dedos, ao ser apertada na palma da mão.
Moles	$0 < IC \leq 0,50$	Facilmente moldada nos dedos.
Médias	$0,50 < IC \leq 0,75$	Requer esforço médio para ser moldada.
Rígida	$0,70 < IC \leq 1,00$	Requer grande esforço para ser moldadas.
Duras	$IC > 1,00$	Não pode ser moldada pelos dedos

Fonte: NBR 1515, 2004.

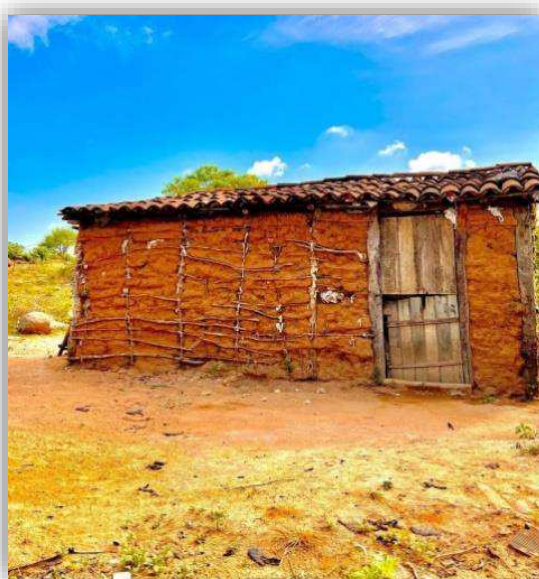
2.4.4.3 Resistência da argila seca

A resistência da argila após a secagem está intimamente ligada à composição granulométrica da mesma. Elias (1995) tem a resistência mecânica independente da concentração de coloides, mas com uma granulometria adequada, o que permite que as partículas coloidais exerçam eficiente papel de aglutinante já que as mesmas são extremamente pequenas, capaz de manter-se em suspensão na água e com poder de aglomerarem os componentes de maior dimensão.

A composição granulométrica mais adequada é aquela que tem substâncias argilosas perto de 60%, estando o resto do material dividido igualmente entre silte, areia fina e areia média (ELIAS, 1995).

As argilas devem ser dosadas a fim de apresentarem plasticidade máxima, quando úmidas, máxima resistência quando secas ou quando queimadas, e mínimas retrações no decorrer da operação; no setor industrial cerâmico, por esses motivos, é muito frequente à mistura de argilas duras com argilas plásticas. A seguir, um exemplo de utilidade da argila muito utilizado até os dias atuais no semiárido nordestino.

Figura 2.7 – Casa de taipa produzida com material argiloso da própria região.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

2.4.4.4 *Perda de água sob ação da temperatura*

Toda a matéria argilosa tem água de constituição e água de absorção ou plasticidade, aquela que está unida à superfície das partículas. A água de constituição possui um valor fixo para cada espécie de material argiloso, sendo eliminada a uma temperatura fixa para cada

mineral, perto de 500°C. Argilas cauliníticas, por exemplo, perto de 500°C passam a perder água de constituição, transformando-se em estruturas amorfas de sílica e alumina; aos 900°C a sílica e a alumina se recombina, cristalizando-se.

2.4.4.5 Retração por secagem

Um bloco cerâmico de material argiloso úmido, quando exposto à secagem, tem sua água evaporada na superfície e difusão mássica dentro do sólido, ou seja, migração de dentro para fora, atingindo a superfície que se encontra mais seca, com potencial para homogeneizar o conjunto.

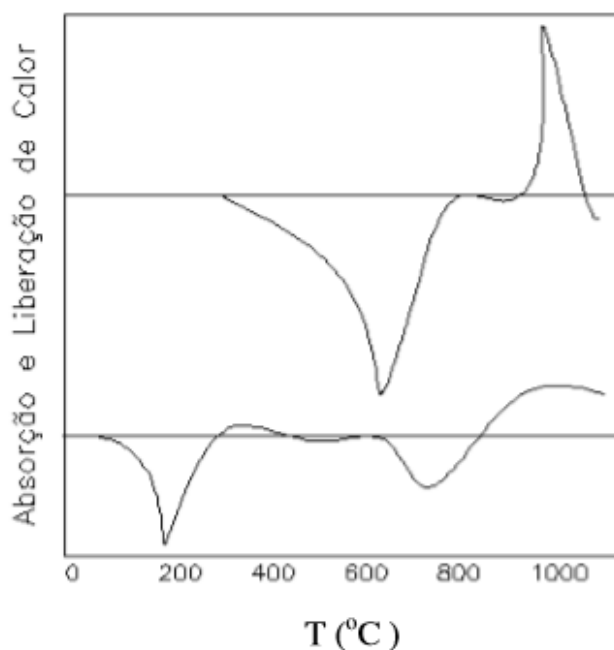
No processo, no lugar antes ocupado pela água vai ficando vazio e, à vista disso, o conjunto retrai-se; a retração é proporcional ao grau de remoção da umidade e varia também com a composição da argila: quanto maior a concentração de grânulos finos, maior a retração.

2.4.4.6 Absorção e liberação de calor

Segundo Albuquerque (2000), durante o aquecimento de uma argila ocorrem transformações ora exotérmicas ora endotérmicas. Na Figura 2.8, a amplitude dos picos de absorção ou liberação de calor, registrada durante uma ATD (Análise Térmica-Diferencial), bem como a determinação das temperaturas em que eles ocorrem, servem para perfeita identificação de uma argila.

Nesta figura, apresenta-se uma ATD de uma argila caulinítica, tendo pico endotérmico aparece entre 600°C e 800°C, onde se dá a perda da água de constituição; próximo aos 900°C aparece o pico exotérmico que indica a fase de cristalização.

Figura 2.8 – Gráfico da análise térmica-diferencial da argila



Fonte: Albuquerque, 2000.

2.5 Propriedades dos materiais cerâmicos

Segundo Albuquerque (2000) e Knarud *et al.* (2020) as propriedades dos materiais cerâmicos são classificadas em propriedades Termo-físicas, mecânicas, elásticas e químicas:

2.5.1 Propriedades termofísicas

- Massa específica aparente (γ): varia normalmente de 1,9 a 2,1 t/ m³;
- Umidade higroscópica de equilíbrio (ψ): normalmente entre 0,5 a 1,0%;
- Absorção aquosa (AA): praticamente nula nas porcelanas, podendo chegar a valores da ordem de 20 a 25% na cerâmica vermelha;
 - Coeficiente de dilatação linear (α): bastante variável, podendo-se assumir o valor $\approx 0,6 \times 10^{-5}$ mm/mm°C para tijolo e $0,3 \times 10^{-5}$ mm/mm°C para porcelana;
- Calor específico (c): perto de 878,22 J/kg°C (cerâmica vermelha);
- Coeficiente de condutibilidade térmica (λ): perto de 0,8364 W/m°C.

2.5.2 Propriedades mecânicas e elásticas

- Resistência a compressão (σ_c): estando entre 2 MPa (tijolo de barro cozido) até 200 MPa nas porcelanas. Nas cerâmicas vermelhas esta resistência é da ordem de 20 a 80 MPa, podendo chegar a valores da ordem de 150 MPa nos pisos de primeira qualidade;
- Resistência à tração (σ_t): normalmente da ordem de 15 à 20% da resistência à compressão;
- Resistência à tração na flexão (σ_f): normalmente da ordem de 15 a 20% da resistência à tração;
- Módulo de deformabilidade longitudinal: os materiais de origem cerâmica são essencialmente frágeis (ruptura sem aviso), apresentando módulo de deformação na ordem de 6000 à 60000 MPa;
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,20$ a $0,30$;
- Dureza superficial: nos pisos cerâmicos essa propriedade é particularmente importante, dado que é muito elevada, chegando em 6 ou 7 na escala de Mohs (feldspato e quartzo).

2.5.3 Características químicas

Apresentam, em geral, bom desempenho frente à ação de agentes químicos como incluindo ácidos e álcalis. Ao contrário, por exemplo, de metais, plásticos e concretos, que estão sujeitos a diferentes mecanismos de degradação como a corrosão, lixiviação, volatilização de componentes. Tal comportamento é justificado, sobretudo, pela estabilidade química da cerâmica, ou seja, não há facilidade de reação entre seus componentes e outros elementos químicos (KNARUD *et al.*, 2020).

Os vidros são constituídos essencialmente por sílica, soda cáustica e cal, além de diversos outros óxidos em pequenas porcentagens. A matéria primeira é fundida e a seguir resfriada, podendo-se, portanto classificar o produto como “material cerâmico”, devido às peculiaridades desse material cerâmico (estrutura amorfa).

2.6 A operação de secagem do tipo convectiva

Ocorre através da transferência da umidade do sólido em questão para o ar que o envolve. À medida que esta transferência se realiza, o material se torna mais seco e o ar mais úmido. Assim, o ar úmido, constituído de ar seco e vapor de água, possui seu estado termodinâmico definido quando se tem o conhecimento das variáveis de estado termodinâmicas, que são imprescindíveis na definição do estado dos gases.

Em seguida são apresentados alguns conceitos que são fundamentais para compreender as peculiaridades desta operação. Ou seja, serão dedicadas diversas páginas para o entendimento das propriedades físicas e termodinâmicas das misturas entre gases e vapor, e suas propriedades psicrométricas (ARAÚJO, 2019).

Figura 2.9 – Preparo da estufa para o processo de secagem do tipo convectivo de tijolos.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

A temperatura de saturação (T^{sat}) é a temperatura de vaporização de uma substância quando submetida a uma pressão (P). A Pressão de Vapor (P_{vapor}) representa a força exercida pelas moléculas do vapor de água em cada elemento de área de ar úmido em razão da movimentação aleatória molecular, quando coexiste o equilíbrio das fases presentes.

O ar possui para cada temperatura uma capacidade de portar determinada quantidade de água na forma de umidade, sendo assim, para cada temperatura de saturação (T^{sat}), existe uma quantidade máxima de moléculas água no estado vapor. Quando se atinge a quantidade máxima de água, essas moléculas exercem no ar o que se chama de pressão de vapor no ponto de saturação ($P_{\text{vapor}}^{\text{sat}}$).

O fator razão de mistura (umidade específica) define a relação entre a massa de vapor de água (m^{vapor}) e a massa de ar seco ($m_{\text{ar seco}}$) presente no mesmo volume considerado, conforme a Equação 2.2. Ou seja, o valor desta propriedade é diretamente proporcional a quantidade de vapor e inversamente proporcional a massa de ar seco.

$$\omega = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{ar seco}}} \quad (2.2)$$

Ao considerar gás ideal tanto a água vaporizada como o ar, tem-se validada a equação (2.3) (ARAÚJO, 2019):

$$\omega = \frac{MM_{\text{vapor}} P_{\text{vapor}}}{MM_{\text{ar seco}} P_{\text{ar seco}}} = \frac{18 P_{\text{vapor}}}{28,97 P_{\text{ar seco}}} = 0,622 \frac{P_{\text{vapor}}}{P_{\text{ar seco}}} \quad (2.3)$$

Conforme o modelo de pressão parcial para gases ideais temos que a razão de mistura pode ser escrita como segue a equação abaixo:

$$\omega = 0,622 \frac{P_{\text{vapor}}}{P - P_{\text{vapor}}} \quad (2.4)$$

A U_{Rel} (umidade relativa) viabiliza a possibilidade de estimar a quantidade de água que o ar pode portar sem que ocorra a precipitação. Desse jeito, constitui-se em uma grandeza adimensional que pode ser calculada por meio da relação das pressões de vapor e de saturação da mistura gasosa em questão (ARAÚJO, 2019).

$$U_{\text{Rel}} (\%) = \frac{P_{\text{vapor}}}{P_{\text{vapor}}^{\text{sat}}} \times 100\% \quad (2.5)$$

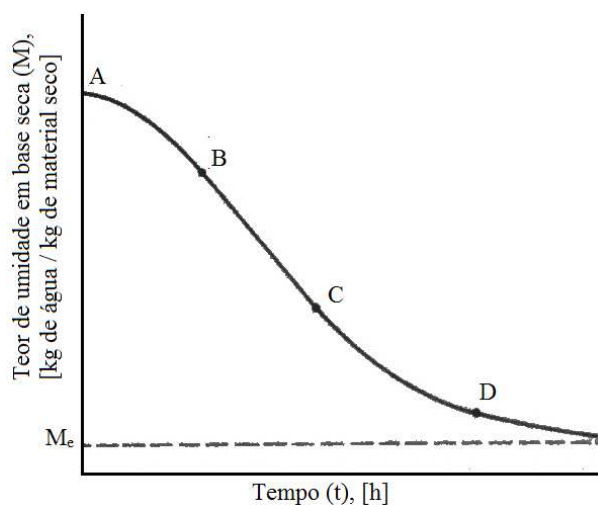
Assim, a U_{Rel} , característica do meio, é capaz de estimar o potencial de secagem que existe na situação em questão.

Em decorrência da operação de desumidificação, espera-se que o transporte mássico de umidade do corpo para o meio que o envolve aproxime a pressão do vapor de água à pressão de saturação nesta película de ar que o envolve, diminuindo o potencial de retenção de umidade da mesma.

Devido à perda de água, como apresentado em Foust *et al.* (2004) que acontece em decorrência da desidratação do corpo, existe uma variação da massa do mesmo devido à perda de água. Assim, pode-se usar duas formas de definir a umidade do corpo, são elas a base seca e a base úmida. a umidade do material pode ser definida em base seca ou em base úmida. A umidade em base seca (M) é definida pela (Equação 2.6), e a curva que exprime o comportamento durante a secagem segue abaixo (Figura 2.5).

$$M = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa seca do material}} \quad (2.6)$$

Figura 2.10 – Teor de umidade em base seca de uma peça em processo secagem.

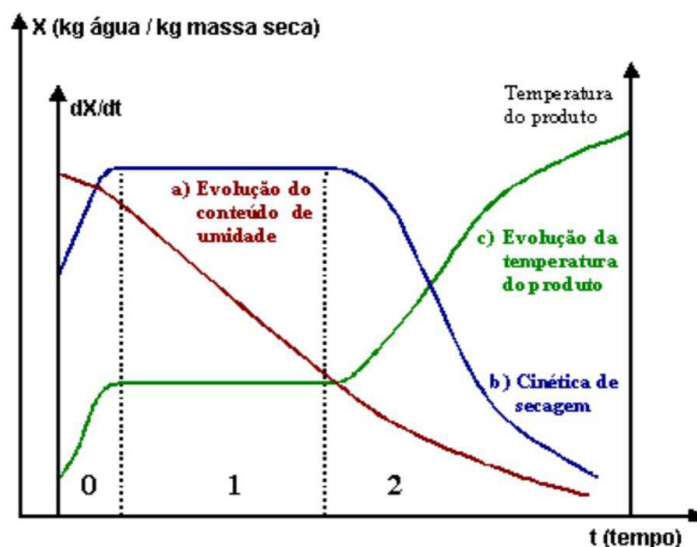


Fonte: FOUST *et al.*, 1982.

Mediante o contato do corpo úmido e frio com ar quente, ocorre uma transferência do calor do ar ao corpo. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre a fase gasosa e a camada superficial do produto viabiliza o transporte de moléculas de água em direção a fase gasosa por meio da vaporização destas moléculas que ocorre através do fornecimento do calor transferido para o corpo (ARAÚJO, 2019).

A evolução destas transferências mássica e caloríficas simultâneas no decorrer do processo operacional secativo permite uma divisão esquemática em três períodos que serão descritos a seguir. Na Fig. 2.6 é mostrada a evolução da concentração aquosa (X) do corpo úmido, seu nível de temperatura (T), e a taxa de secagem (dX/dt), em um experimento utilizando ar de propriedades constantes.

Figura 2.11 – Relações entre as curvas de concentração (X), temperatura (T) e taxa de secagem (dX/dt).



Fonte: acervo do autor, 2022.

O segmento de curva marrom da última figura apresentada representa a perda de umidade do corpo no decorrer do tempo. A curva azul representa a taxa (dX/dt) de perda de umidade do corpo, que consiste na variação mássica de água num espaço de tempo. A curva verde representa a evolução térmica do corpo (T).

Descrevendo os três períodos temos que no período 0, conhecido como período de indução ou período que antecede o regime operacional, o corpo é geralmente mais frio do que a fase gasosa, e a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto (p) é pouco significativa, e por consequência, o transporte mássico e a velocidade de desidratação também são débeis (FARIAS, 2002).

O calor chegando em excesso acarreta elevação térmica do corpo ocorrendo um aumento de pressão e velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que o Transporte calorífico compense exatamente o transporte mássico. A duração deste período é insignificante em relação ao tempo final, como visto Park et al. (2007).

Após o período 0, temos o período 1, conhecido como período de velocidade constante. Nele, como no anterior, a água disponível dentro do corpo é grande. A pressão de vapor de água na superfície é constante sendo igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do corpo que, por sua vez, é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica principal para a existência do fato de que os transportes calorífico e mássico se compensem. Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a camada superficial do corpo seja suficiente para acompanhar a perda superficial por evaporação (VILLAR, 1988).

Vale ressaltar que para os materiais biológicos e outros que possuem uma elevadíssima resistência ao transporte de mássico, inexistem o período 1, pois as condições operacionais de secagem são tais que, as resistências ao transporte mássico encontram-se essencialmente no interior do produto, determinando que a taxa de evaporação superficial seja bem superior à taxa de reposição de umidade na mesma (STEEF E SINGH, 1980).

Segundo Reeds (1991), o estágio de velocidade ou taxa decrescente de secagem, representado pelo período 2, inicia-se na etapa em que a água começa a ser deficiente na superfície. Apesar de alguns autores definirem o valor da concentração aquosa do produto na transição entre os períodos 1 e 2 como sendo a concentração de água crítica (X_c), é conveniente denominar este ponto como de inflexão e transição, de taxa constante à taxa decrescente de secagem, pois este ponto, distante de ser uma propriedade física do material, é um ponto que depende inclusive das condições operacionais.

Neste período, a troca de calor não é mais compensada, conseqüentemente, a energia térmica do corpo aumenta e tende assintoticamente à temperatura da fase gasosa. Em todo este período o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da velocidade de secagem é às vezes interpretada como uma diminuição da superfície molhada no período 2, mas a interpretação mais frequente é pelo abaixamento da pressão parcial de vapor de água superficial. No final deste período o produto estará em equilíbrio com a fase gasosa que o envolve ($X = X_e$) e a taxa de secagem será nula (REEDS, 1991).

O terceiro período é quase sempre o único percebido quando o objeto estudado é constituído por produtos agrícolas e alimentícios. A complexidade dos fenômenos envolvidos na secagem conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para prever a velocidade de secagem: Teoria difusional; Teoria capilar; Teoria de Luikov; Teoria de Philip & de Vries; Teoria de Krisher-Berger & Pei; e Teoria da condensação-evaporação. As duas primeiras teorias são básicas e fundamentam as outras teorias. A partir dessas teorias são deduzidos ou estimados os coeficientes de transporte resultantes.

Em Foust *et al.* (1982) é possível verificar um estudo diferenciado a respeito da velocidade com que a umidade se desprende do corpo (M'), esta velocidade pode ser crescente, decrescente ou constante como visto não somente na figura supracitada, mas também na figura a seguir, na qual observa-se um gráfico da taxa de secagem (M') relacionada com o percentual aquoso em base seca (M). Isto posto, tem-se que no trecho AB a velocidade é crescente. Por conseguinte, a camada superficial do corpo possui uma película aquosa, gerando uma

igualdade térmica entre a camada superficial e a temperatura de bulbo úmido presente na fase gasosa.

A velocidade (M') é estável no trecho seguinte, uma vez que a camada superficial permanece saturada, na qual possui uma temperatura de bulbo úmido. A difusão mássica das moléculas de água através da camada superficial que envolve o corpo se eleva com o aumento da velocidade da fase gasosa que o perpassa.

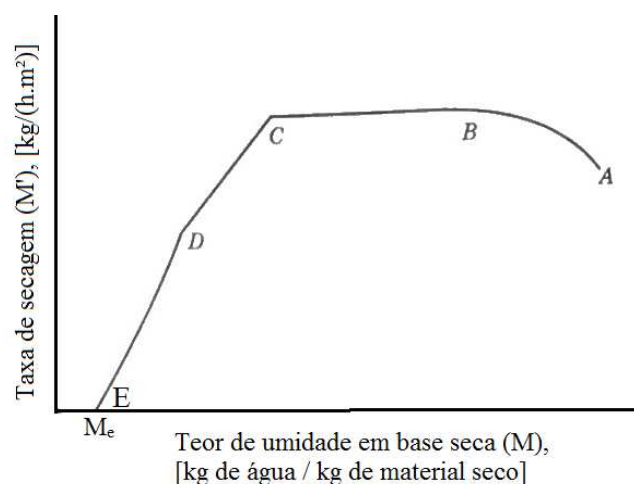
O aumento da velocidade da fase gasosa também reflete no crescimento do valor do coeficiente de transporte calorífico, estando sujeito a uma diminuição caso a camada limite da fase gasosa aumente de tamanho (RODRIGUEZ-RAMIREZ *et al.*, 2000).

Fortes e Okos (1980) entendem que o tempo de duração que a velocidade de secagem se estagna é influenciado diretamente pelos coeficientes de transporte mássico e calorífico envolvidos, assim como a forma geométrica do corpo e do diferencial térmico entre o corpo e a fase gasosa.

No penúltimo trecho de secagem apresentado na figura a seguir, situado entre os pontos C e D, tem-se um estágio em a velocidade começa a apresentar sinais de decaimento. Ou seja, a intensidade da migração das moléculas líquidas do centro do corpo para a camada superficial não corresponde a quantidade de moléculas que migram da desta camada superficial para a fase gasosa circundante. Esta etapa da secagem se encerra com a umidade chegando ao ponto D, no qual representa insaturação superficial (FOUST *et al.*, 1982).

No último trecho apresentado na figura a seguir, situado entre os pontos D e E, tem-se mais um estágio de decaimento da velocidade de migração da umidade. Nesse estágio as pressões de vapor da água Toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido. As pressões de vapor superficial e da fase gasosa produzidas pelas moléculas de água presente se igualam atingindo a pressão da fase gasosa. Neste momento diz-se que a umidade de equilíbrio foi atingida, conseqüentemente no equilíbrio, a quantidade de moléculas que vaporiza para a fase gasosa corresponde a mesma quantidade que se condensa (BROOKER *et al.*, 1992).

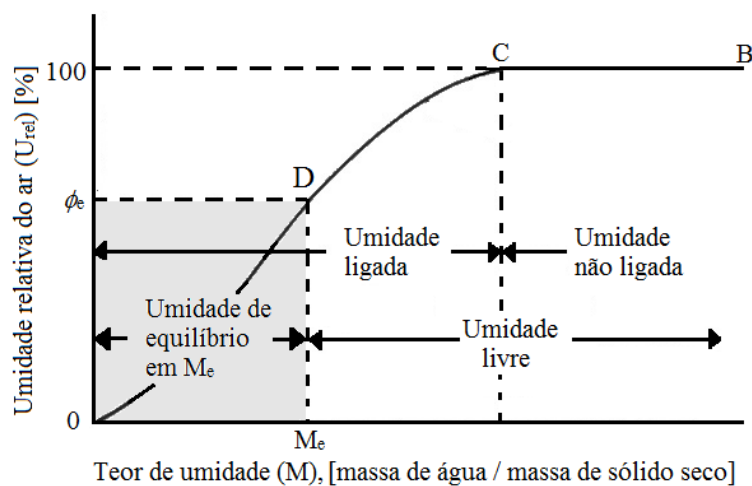
Figura 2.12 - Taxa de secagem em função do teor de umidade em processos de secagem de materiais.



Fonte: Adaptado de Foust *et al.*, 1982.

A natureza higroscópica de alguns materiais pode ser enquadrada em materiais não inertes como os de origem orgânica provenientes de celulose, e os inertes, como os de origem, inorgânica: material arenoso e cerâmico. Ambos possuem porosidade que pode conter moléculas líquidas que representa a umidade (KHAN E STRAATMAN, 2016).

Figura 2.13 – Tipos de umidade envolvidos na secagem de sólidos.



Fonte: Araújo, 2019.

Com o intuito de melhorar o entendimento a respeito dos fenômenos que envolvem a migração de umidade, será trabalhado a seguir de forma esquemática a conceitualização dos tipos de umidade que podem estar presentes nas operações de desidratação e desumidificação de diversos materiais a pouco relatado (CHEN *et al.*, 2012):

- Umidade crítica: é definida como estado caracterizado pela finalização do estágio de taxa decrescente.

- Umidade de equilíbrio: conceituada como umidade presente e retida no corpo quando o mesmo está em um estado de equilíbrio com a fase gasosa úmida, que pode acolher por meio de migração esta umidade (ARAÚJO, 2019).
- Umidade livre: conceituada como a classe que está presente e retida no corpo, na qual sua migração só acontece quando submetida a mudanças em condições operacionais estabelecidas.
- 0 Umidade não-ligada: conceituada como a classe que pode ser compreendida como um tipo de quantidade de água a mais presente, mas não interativa com os componentes do corpo, geralmente localizada e representada pela camada superficial de água conhecida como película ou filme líquida. Cabe esclarecer que nesses ambientes em que se forma uma película de água, como na camada superficial do corpo, as condições são propícias para o surgimento da umidade não-ligada, já que o microambiente analisado está sob condições ambientais de saturação aquosa (BATISTA *et al.*, 2008).
- Umidade não-ligada: conceituada como a classe que pode ser compreendida como um tipo de quantidade de água a mais presente, mas não interativa com os componentes do corpo, geralmente localizada e representada pela camada superficial de água conhecida como película ou filme líquida (PEARSON *et al.*, 2019). Cabe esclarecer que nesses ambientes em que se forma uma película de água, como na camada superficial do corpo, as condições são propícias para o surgimento da umidade não-ligada, já que o microambiente analisado está sob condições ambientais de saturação aquosa.
- Umidade-ligada: Assim, dentro dessa conceituação, a classe a qual pertence a umidade ligada é composta por ambientes na qual está presente no corpo quando ele não está com concentração saturada de umidade (SILVA, 1991).

2.6.1 Teoria da difusão líquida

Teoria difusional pode ser definida como em Hasatani e Itaya (1992) que se apoiam exclusivamente sobre a lei de Fick, expressando a ideia de que a difusão mássica por unidade de área é proporcional ao diferencial da quantidade de água presente entre os pontos em que ocorre a difusão (Força motriz da migração aquosa). 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 conceito da teoria difusional líquida amplamente representado mediante a 2ª lei de Fick, é inúmeramente utilizado para representar condições operacionais em que ocorre a desumidificação ou desidrataação de corpos úmidos. Sua utilização permite ao estudo a determinação do coeficiente de difusão efetivo conforme descreve Correa *et al.* (2010).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.7)$$

Existem diversos tipos de produtos que são submetidos a operação de desumidificação, nos quais, em geral, podem ser muito diferentes entre si, devido a sua composição, estrutura, e suas dimensões (CHEN *et al.*, 2013). Cada material submetido à secagem pode revelar uma curva típica de secagem, além de quê, as condições operacionais de secagem são muito diversas, influenciando, também em sua evolução gráfica.

As condições operacionais de desumidificação dependem das propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar/produto, ou seja, depende diretamente do tipo de secador. Por este motivo, diversos modelos específicos de secagem dependem do secador a ser utilizado (SANTOS, 2019).

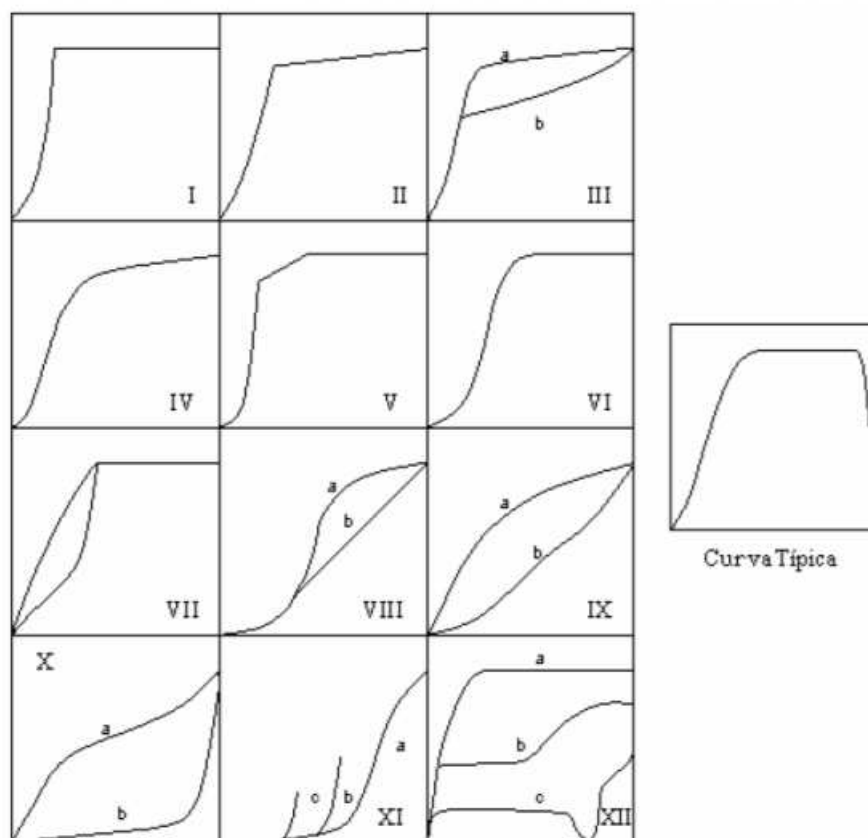
Van Brackel (1980) resumiu e classificou em doze categorias, um grande número de curvas experimentais de taxa de secagem, publicadas na literatura. Este trabalho reproduzido na Figura 4, ilustra a diversidade das formas de evolução gráfica de secagem em relação aos casos típicos.

Para as categorias de I a VII e XII, que se referem, sobretudo a produtos não biológicos, pode-se observar geralmente um período 1 bem definido, porém é bem raro que a velocidade de secagem seja rigorosamente constante. Van Brackel (1980) indica os fenômenos de superfície que acarretam uma ligeira diminuição de velocidade (ou taxa) de secagem durante este período.

As categorias VIII a XI, referem-se à produtos biológicos, e só o estágio secativo de taxa decrescente está presente. A transição do período 1 ao período 2 é frequentemente pouco nítida e a determinação da concentração aquosa neste ponto é delicada. Sob outro ponto de vista, a concentração aquosa do ponto de inflexão varia conforme a natureza do material, sua espessura e tempo de secagem inicial, que depende dos fatores operacionais da operação em

questão (BATISTA *et al.*, 2009). Conforme pode ser notado, para a interpretação da cinética de secagem deve-se utilizar a curva (b) em vez da curva (a).

Figura 2.14 – Evolução gráfica da secagem adimensionalizadas.



Fonte: Van Brackel, 1980.

Onde, conforme Van Brackel (1980):

1. I e II. Leito de bolas de vidro, de areia, de argila, de areia com argila, de calcário, de silicagel;
2. III. Evaporação de substância orgânica num leito bolas de vidro a) benzeno, b) n-pentanol;
3. IV. Leito de bolas de poliestireno;
4. V. Areia, argila com plástico, cerâmica;
5. VI. Particulado;
6. VII. caso (I) com diferentes curvaturas no período decrescente, exemplo: silicato de alumínio para diferentes temperaturas ou areia e papel para diferentes espessuras.
7. VIII. Madeira,
8. IX. a) papel, lã, estearato de alumínio, b) tapioca, farinha;
9. X. a) pão de centeio, fermento (leveduras), b) manteiga;

10. XI. a) grãos de trigo, b) e c) continuação da secagem depois de uma interrupção;
XII. a) calcário impregnado de água, b) tijolo de argila;

Para ajustar as informações empíricas a equações de cinética de secagem foram realizadas regressões não lineares, sendo os parâmetros estimados pela minimização dos quadrados dos resíduos.

Em uma análise bibliográfica foi possível constatar a utilização do modelo difusional líquido na desidratação de raízes e folhas como batata (MCLAUGHLIN E MAGEE, 1999; ISLAM *et al.*, 2003) e alho (YOUNIS *et al.*, 2018). Ainda, em frutas como banana (LIMA *et al.*, 2002; SILVA, C. *et al.*, 2012; FARIAS *et al.*, 2016) observou esta teoria.

Mediante materiais argilosos e cerâmicos tem-se a difusão líquida utilizada por diversos autores como: van der Zanden *et al.*(1996); Augier *et al.*(2002); Silva *et al.* (2013), Silva, W. *et al.* (2012). Recentemente temos Nascimento *et al.*(2004); Cadé *et al.*(2005); Tavares (2012); Silva *et al.*(2013); Brito (2016).; Araújo (2019).

2.7 Processamento, aplicação e estudos experimentais dos materiais cerâmicos: revisão bibliográfica.

Como demonstrado até o momento, tanto melhorias operacionais como diversos materiais umidificados foram o foco de diversos experimentos empíricos e numéricos, por conseguinte, a literatura sobre diversas fontes de materiais e inúmeros objetos de interesse para esse processo operacional estão entre o rol de trabalhos bastante explorados tanto por estudos experimentais como por numéricos computacionais.

As pesquisas que envolvem os materiais de origem argilosa, sejam elas experimentais ou numéricas, buscam os mais diferentes objetivos. Todavia, dentre eles, destaca-se a importância e relevância de se estudar os valores do coeficiente difusivo mássico do componente em migração no interior do corpo submetido a secagem.

Almeida *et al.* (2016) em seu texto teve como alvo o estudo do tema em questão, relatando de diversos trabalhos voltados para esses materiais em questão, pois auxilia na compreensão dos efeitos desagradáveis causados por uma má condução operacional, como fissuras na peça final (WANG *et al.* 2020; BATISTA *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2011; NASCIMENTO *et al.*, 2015).

O presente trabalho, ao estudar a secagem, busca a ampliação de conhecimentos científicos não somente na área de produção cerâmica, mas também na aplicação prática dos blocos cerâmicos atendendo as normas regulamentadoras vigentes. Neste quesito Knarud *et al.* (2020) retrata a umidificação e desumidificação de paredes de alvenarias de construções na busca de relacionar este processo à otimização do conforto térmico que pode ser proporcionado no ambiente em que os blocos cerâmicos estão dispostos.

Já no quesito de otimização do processo, o presente trabalho busca reduzir o consumo energético por meio da eliminação da etapa de queimagem, visando a elaboração de um bloco cerâmico que atenda o quesito de resistência mecânica conforme regulamenta as normas regulamentadoras vigente. Uma vez que, nesse sentido, Wang *et al.* (2020) em busca por uma otimização energética, defende a ideia de que a secagem e queimagem são os estágios que consomem mais energia na fabricação cerâmica. Estas duas etapas chegam a consumir cerca de 54,67% da energia total do processamento.

Ainda nesse sentido, Wang *et al.* (2020) estudou o impacto ambiental da produção de cerâmicas em unidades industriais de fabricação visando a adoção de tecnologias de produção limpas. A presente pesquisa entendendo a relevância na questão ambiental, buscou a reutilização do resíduo sólido produzido nas estações de tratamento de água da região do semi-árido nordestino para adicionar na massa argilosa, visando a melhoria do bloco cerâmico.

Figura 2.15 – De caráter artesanal, o filtro de barro tem sido bastante utilizado na região do nordeste.



Desde os tempos antigos é possível perceber que o ser humano sempre lidou com o processo de secagem, desde os alimentos até os tijolos que são materiais que proporcionavam uma forma segura de habitação. É notório que a metodologia de processamento de materiais cerâmicos utilizada amplamente pelas olarias espalhas pelo país, tem sido substancialmente pouco alterada ao longo dos últimos séculos, muito devidamente ao seu caráter artesanal.

Entretanto já é possível observar na literatura novas propostas de métodos de aquecimento e secagem de blocos cerâmicos, a exemplo do estudo de Baia *et al.* (2019), que realizou um processo de aquecimento de tijolos artesanais utilizando energia de micro-ondas. Em conformidade com esta ideia, utilizou-se a luz solar como fonte de fornecimento de calor para a secagem do lodo utilizado na adição à massa argilosa que fora utilizada na elaboração do tijolo cerâmico da presente pesquisa.

O processo de conformação da massa cerâmica possui extrema importância no controle de qualidade da peça produzida. Falhas nessa etapa produzem defeitos irremediáveis ao tijolo. Nesse contexto, Pearson *et al.* (2019) utilizou gás carbônico supercrítico para dar forma a massa argilosa antes de adentrar no processo de desumidificação, objetivando proporcionar uma otimização do processo secativo, enquanto o presente estudo, utilizou formas metálicas para esta finalidade.

Neste tópico serão elencados alguns temas e trabalhos abordados na literatura de domínio público a respeito no tocante aos estudos experimentais que envolvem a produção cerâmica. Nesse sentido serão desdobrados assuntos referentes às pesquisas nessa área, bem como as aplicações para o presente trabalho.

Lucchi *et al.* (2019) desenvolveram um modelo para prever o comportamento térmico transiente do forno em modo de convecção forçada, incluindo o transporte calorífico e mássico que ocorre entre o bloco cerâmico úmido e o ar da cavidade. Os parâmetros do modelo foram determinados através de um procedimento de otimização baseado em dados experimentais. As comparações com outros conjuntos de dados experimentais também permitiram validar a capacidade preditiva do modelo. O modelo prevê bem a temperatura do ar do bloco cerâmico em questão.

Não diferente, o presente trabalho, assim como Lucchi *et al.* (2019), compara um conjunto de dados experimentais a respeito da secagem com os dados obtidos via simulação numérica, permitindo assim, a validação da capacidade preditiva do modelo em questão, desenvolvido via software CFX.

Lehmkuhl (2004) escolheu uma argila utilizada pelo setor fabril da região de Criciúma-SC para construir amostras de blocos cerâmicos cilíndricos de 63 mm de diâmetro e 20 mm

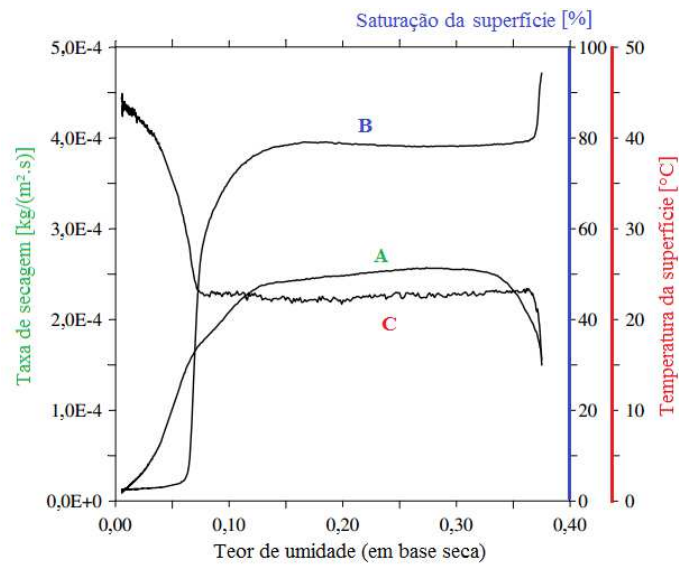
de altura. O autor construiu um aparato experimental constituído por uma estufa com ventilação interna e controlador programável de temperatura, uma balança posicionada sobre o teto da estufa, uma bandeja para colocação das amostras, um medidor de umidade relativa e um dispositivo de controle de umidade absoluta. A bandeja é acoplada à balança através de um fio inextensível que atravessa o teto da estufa por um pequeno orifício.

Nos experimentos de Lehmkuhl (2004), as taxas de secagem se igualam depois de transcorrido cerca de 50% do tempo de secagem, com as amostras apresentando umidade abaixo de 6%. Vale lembrar que, na indústria, é usual se retirar peças dos secadores com concentração aquosa perto de 3%. Assim, metade do tempo utilizado na secagem é para se eliminar os últimos 3% de umidade e que, a otimização da confecção da amostra, influência, de forma moderada, somente os primeiros 50% do tempo total.

Lehmkuhl (2004) estudou também um secador tipo túnel com ventiladores autoviajantes, pertencente à Cerâmica Candelária – RS, constando de um túnel de aproximadamente 80 m de comprimento com duas vias, cada qual com capacidade para 38 vagonetas de 2 m cada. A injeção de ar quente acontece por um canal central, no solo, com aberturas reguláveis, ao longo do comprimento do secador. A extração de ar úmido é feita na entrada da carga, em aberturas localizadas no solo, junto às paredes laterais. Este autor demonstrou que a convecção forçada associada a alta temperatura do ar de secagem diminui significativamente o tempo final do processo.

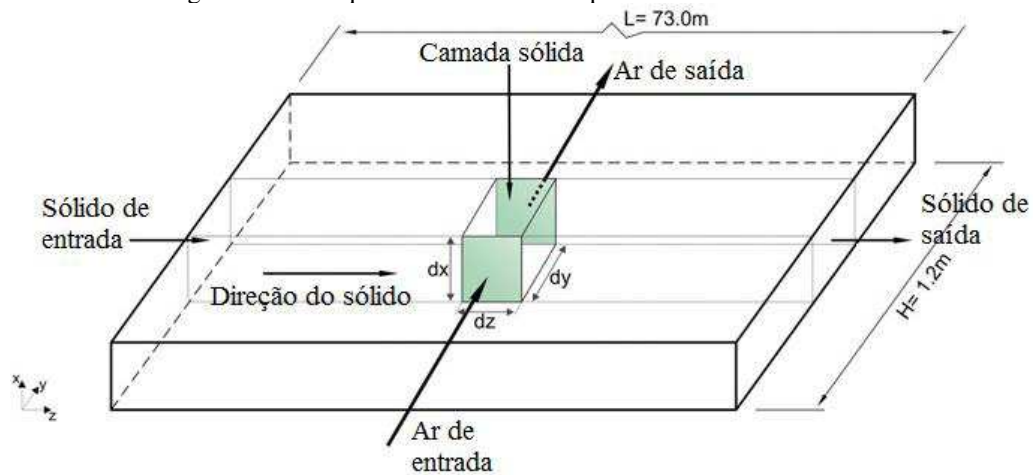
É possível a redução, por meio da modelagem numérica, da concentração de umidade dos blocos cerâmicos de cerca de 30% para números perto de 3% conforme Almeida *et al.* (2013), na qual teve sua pesquisa realizada por meio do desenvolvimento de um sistema secativo em túneis de fluxo cruzado. Assim como no presente trabalho, a modelagem matemática foi elaborada mediante o uso do método de volumes finitos viabilizado pelo software Mathematica®, no qual o domínio matemático de cálculo, bem como seus valores iniciais em questão estão na figura a seguir.

Figura 2.16 – Processo secativo do bloco cerâmico



Fonte: Belhamri, 2003, apud Araújo, 2019.

Figura 2.17 – Esquema do secador do tipo fluxo cruzado utilizado.



Fonte: Almeida *et al.*, 2013.

2.8 A importância da modelagem computacional: revisão bibliográfica.

Inúmeras metodologias para a área de secagem auxiliada pelo avanço computacional foram desenvolvidas nos últimos 20 anos, Fig. 2.14. A termofluidodinâmica computacional foi utilizada no trabalho de diversos pesquisadores como Defraeye (2014), Boukadida e Nasrallah (2002), Silva (2009) e Shokouhmand et al. (2011), tendo se consolidada como uma ferramenta robusta e versátil.

Tavares (2012) enfatiza que o CFD pode ser usado como uma possibilidade para pesquisas empíricas que visem uma posterior extrapolação de escala. Um ponto forte enfatizado por este autor é a possibilidade de se seguir o caminho das partículas e o acesso possível do acompanhamento das propriedades do processo com clareza e nitidez.

Boukadida e Nasrallah (2002) defendem que a pesquisa matemática por modelagem para estudos de transporte calorífico e mássico de fenômenos que envolvem o processo secativo, principalmente de matérias de origem cerâmica, transmite confiabilidade pela concordância entre os dados empíricos e numéricos. Após a análise dos resultados de seus trabalhos, os mesmos perceberam que a grandeza da velocidade de desumidificação é mais proeminente a altas temperaturas.

No município paraibano de Santa Rita, foi recolhida uma amostra para análise mineralógica do material argiloso que era utilizado como insumo de blocos cerâmicos para a produção industrial da Cerâmica da marca Cincera. Silva (2009), em sua pesquisa, defende que a modelagem numérica é extremamente útil para o estudo de processos difusivos, aplicando as Leis de difusão mássica e calorífica de Fick e Fourier.

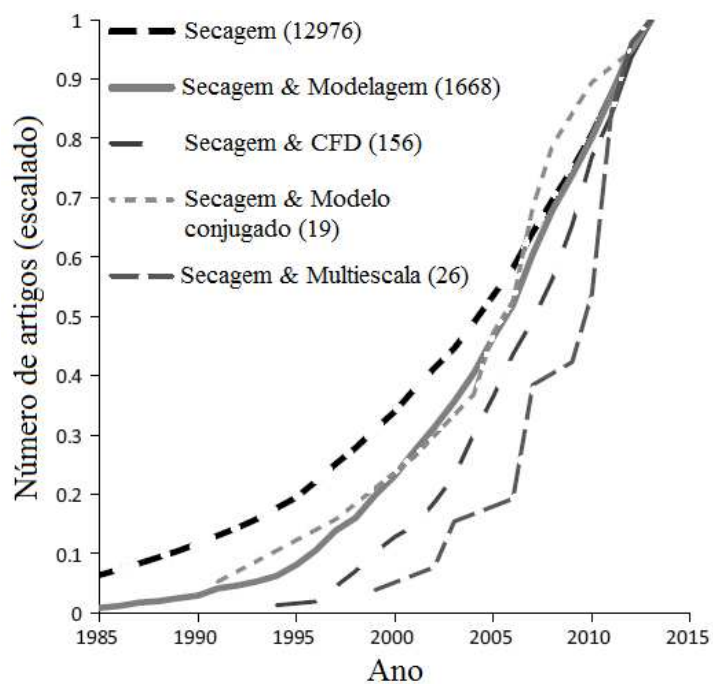
A modelagem tridimensional de projetos de secadores industriais tem sido defendida por Lima (1999) para a obtenção de valores para os coeficientes de transporte envolvidos no processo. As Leis de Fourier, de Darcy e de Fick, serviram como base para a obtenção de diversas características dos dispositivos em questão.

O software COMSOL Multiphysics mencionado por Zhang *et al.* (2019) produziu diversos resultados coerentes no estudo da modelagem secativa de blocos cerâmicos que continham biomassa de origem celulósica, obtendo relações entre as propriedades estudadas.

Através sistema operacional software Wolfram Mathematica®, foram desenvolvidos modelos numéricos transientes em 3D utilizando-se as leis de Fick e Fourier para determinar os transportes caloríficos e mássicos enquanto o bloco cerâmico foi submetido ao processo secativo (BRITO *et al.*, 2016).

Dessa forma, percebe-se que a termofluidodinâmica computacional oferece diversos suportes lógicos na forma de programas que se difundido bastante por serem capazes de prever processos que ocorrem em fornos, estufas, muflas e equipamentos pulverizadores voltados para o transporte e migração de umidade. Conforme apresentado, a presente pesquisa utilizou-se dos programas ANSYS Fluent[®] e ANSYS CFX[®].

Figura 2.18 – Número de artigos sobre a metodologia de secagem.



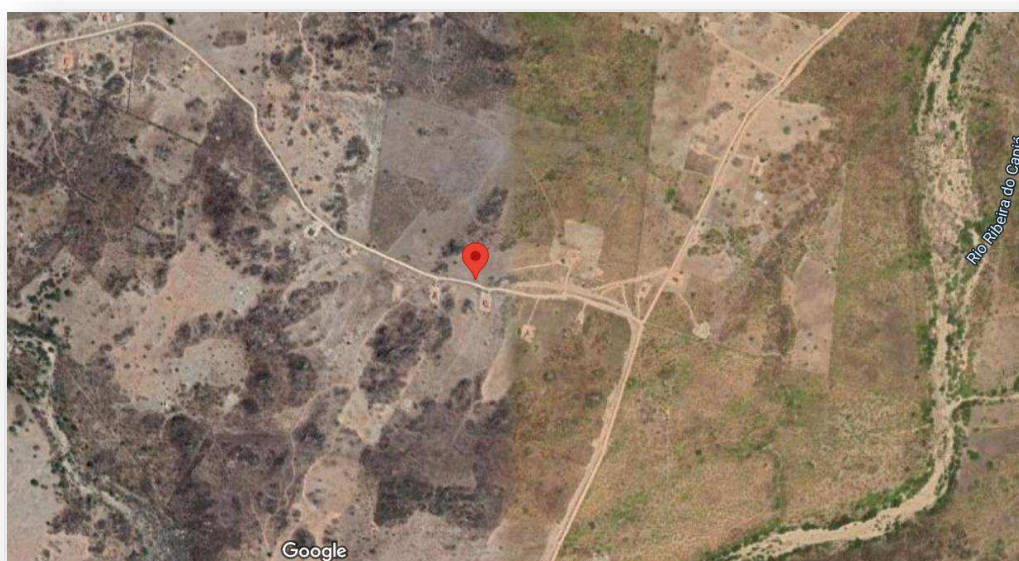
Fonte: Defraeye, 2014.

2.9 Desenvolvimento do tijolo ecológico por meio do lodo de ETA

2.9.1 A ETA

A fase experimental do desenvolvimento do tijolo ecológico se deu na na Estação de Tratamento de água (ETA), localizada no distrito Piau (6.567 habitantes), pertencente ao município de Piranhas (AL).

Figura 2.19 – Localização da ETA onde foi realizada a pesquisa experimental, situada na zona rural de Piranhas (AL), rio Capiá ao lado direito.



Fonte: Google Earth, 2022.

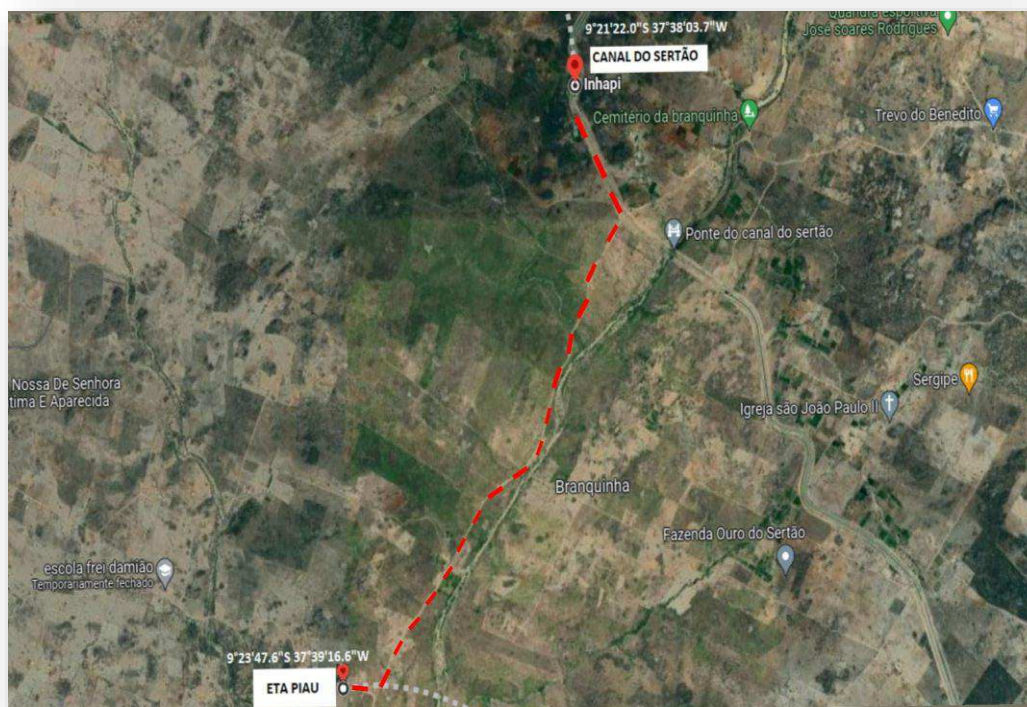
A ETA é uma obra do governo federal, projetada e executada sob responsabilidade da FUNASA, sendo inaugurada em novembro de 2020. Desde sua inauguração sua posse pertence ao município de Piranhas, entretanto sua operação é realizada pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL). Essa ETA do tipo compacta com dupla filtração (ascendente/descendente) e com reaproveitamento das águas de lavagem, por meio do leito de secagem, possui capacidade de tratamento de 144,00 m³/h.

O sistema de fornecimento de água para essa estação ocorre através de uma captação independente, localizada às margens do trecho III do canal do sertão alagoano – situado entre Inhapi (AL) e Piranhas (AL) –, no qual um conduto forçado do tipo sifão com DN 250 mm conduz, por meio da energia gravitacional, a água até a ETA.

Em busca de uma otimização energética para o projeto, as coordenadas geográficas da captação no trecho III do canal e de localização da ETA foram escolhidas de forma que fosse possível aproveitar a energia gravitacional em ambos os casos para proporcionar os escoamentos nos dutos envolvidos.

Dessa forma, para a captação de água bruta, foi adotada uma solução por meio do uso do sifão hidráulico, DN 250 mm, às margens do canal que que conecta a captação à Estação de Tratamento de Água por meio de uma adutora de aproximadamente 6 Km como pode-se perceber na figura a seguir (SANTOS, 2023).

Figura 2.20 – Trajeto da adutora, em traçado vermelho, ligando a ETA a sua captação.



Fonte: Santos, 2023.

A figura a seguir mostra a captação da ETA às margens do canal, onde é feita a captação da água bruta que segue para a estação de tratamento e posterior distribuição para a população do povoado Piau (Piranhas – AL).

Além de contar com bombeamento da captação sifonado por gravidade, reaproveitamento da água de lavagem, a mesma ETA conta com a produção de energia limpa, ou seja, é composta por sistema de produção energética fotovoltaica, responsável pelo fornecimento de energia para toda a estação.

Figura 2.21 – Captação da ETA no canal do sertão em Piranhas (AL).



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Os componentes do sistema são dispostos em um único espaço, de forma compacta, formando um conjunto de elementos de fácil acesso, além dos citados acima, há também a sala de química e o laboratório da unidade.

Ao chegar à estação a água segue diretamente para a câmara de carga piezométrica que tem a função de equalizar sua pressão de forma que possa atender ao processo de filtração superando a perda de carga existente dentro do leito filtrante, figura a seguir.

O sistema de filtração é composto por 3 conjuntos de filtros de leitos filtrantes de areia, sendo cada conjunto composto por dois filtros em séries – onde o primeiro ascendente e o segundo descendente.

Após a filtração, a água é direcionada para os tanques de contato, local do processo onde é adicionado cloro com a finalidade de tornar a água livre dos agentes patogênicos, que são os vírus, fungos, bactérias e algas.

Figura 2.22 – ETA responsável pela produção do lodo utilizado no desenvolvimento do tijolo ecológico.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Só então, após a desinfecção, a água recebe o título de tratada, onde é encaminhada para o reservatório, localizado em ponto geográfico suficiente para atender a zona rural e a zona urbana do Pov. do Piau (Piranhas – AL).

O sistema de filtração é composto por 3 conjuntos de filtros de leitos filtrantes de areia, sendo cada conjunto composto por dois filtros em séries – onde o primeiro ascendente e o segundo descendente. Eles recebem a água bruta da câmara de carga piezométrica apresentada na figura a seguir, e a envia para os tanques de contato que injetam na água filtrada uma corrente de cloro concentrado, de modo a proporcionar uma água tratada com saída da ETA com cloro residual de 0,2 a 2 ppm, conforme Consolidação nº 888 de 2020 do ministério da saúde.

Figura 2.23 – Camara de pressão, responsável pela uniformização da pressão para os filtros.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Os equipamentos que compoem a ETA estão na tabela abaixo.

Tabela 2.4 – Composição da Estação de Tratamento de água em estudo.

QUANTIDADE	COMPONENTE	DIMENSÕES
01	Câmara de carga piezométrica	Diâmetro: 1,00 m Altura: 6,70 m
03	Filtros modelos ascendente com leito filtrante de areia (CFA)	Diâmetro: 3,00 m Altura: 3,20 m
03	Filtros modelos descendente com leito filtrante de areia (CFD)	Diâmetro: 3,00 m Altura: 3,20 m
02	Tanques de contato e desinfecção	Diâmetro: 2,00 m Altura: 2,60 m
02	Reservatórios elevados (REL)	Volume: 20.000 L
02	Reservatórios apoiados (RAP)	Volume: 500.000 L
02	Tanques Adensador de Lodo (TAL)	Diâmetro: 3,00 m Altura: 3,20 m
05	Câmaras de Leito de Secagem de lodo (LSL)	Largura: 3,00 m Comprimento: 8,05 m

Fonte: Santos, 2023.

2.9.2 A produção de resíduos em ETAs

O cuidado com os resíduos sólidos, assim como com o esgotamento sanitário está assistido na lei de Política Nacional de Saneamento Básico de n. 11.445, de 05.01.2007 (atualizada pela Lei n. 14.026, de 15.07.2020) que tem se mostrado esforço dos órgãos do Estado em trazer melhorias e sustentabilidade para o setor que envolve o saneamento básico (IBGE, 2021, p. 92).

No conceito de gestão hídrica sanear o processo de tratamento de água é uma condição necessária, visto que a água que é distribuída a população precisa ser oriunda de um processo sustentável isento de lançamento de resíduos sólidos nos corpos hídricos, ou seja, sem agressão ao meio ambiente.

Contudo, na grande maioria dos tratamentos de água espalhados pelo Brasil a fora, há o despejo de resíduos em corpos hídricos afetando diretamente a própria água captada e tratada pela mesma ETA responsável pelo lançamento do resíduo (IBGE, 2021, p. 91).

Dessa forma, conforme o próprio Ministério do Meio Ambiente (2000, p. 10), não bastasse a preocupação gerada com relação à quantidade de água que pode gerar escassez nos anos futuros, o quesito qualidade de água disponível também tem se tornado fonte de preocupação devido às problemáticas recorrentes nas captações e no tratamento adequado.

O principal resíduo semi-sólido proveniente do tratamento da água surge a partir de material coloidal suspenso e particulado tanto de origem orgânica como de origem mineral, por processos antrópicos ou da natureza (PEREIRA, 2004, p. 23-28). Assim como a quantidade de sólidos em suspensão impacta diretamente na desinfecção da água, visto que fazem uma barreira de proteção aos microrganismos atuantes (LIBÂNIO, 2010).

A quantidade de coagulante adicionado no tratamento da água, que impacta diretamente na produção do resíduo a quem chamamos de lodo, é estimada pelo nível de turbidez presente na água. Onde a turbidez, medida através do turbidímetro ou Nefelômetro, é uma propriedade físico-química que mensura a quantidade de partículas sólidas suspensas na água.

A propriedade Cor, presente na água, é um indicativo da existência de elementos orgânicos, como os taninos, ácidos húmicos, fúlvicos ou mineral. Vale ressaltar que o mesmo coagulante utilizado para combater alta turbidez, também é utilizado para diminuir a cor (SANTOS, 2023).

O uso de coagulantes para a eliminação de impurezas na água a base de sais com cargas opostas, que neutralizam os compostos com potencial aglutinantes, a base de

alumínio, ferro e cloretos, atuam de forma eficaz na coagulação da água otimizando os processos de decantação e filtração dos sólidos suspensos, os quais são, em sua maior parte, carregados negativamente, o que faz com que as partículas fiquem em repulsão.

Por esse motivo, o coagulante inserido, geralmente, possui características de carga positiva, atuando como neutralizante e facilitador da agregação das partículas em busca da formação de flocos que posteriormente pode ser retido na decantação ou filtração, a qual se constitui em exigência legal para águas com a finalidade de consumo humano advinda de mananciais superficiais (BRASIL, 2014, p.132).

O sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$, que por sinal, é um coagulante amplamente utilizado como coagulante nas ETAs do sertão alagoano pela CASAL, quando em contato com os sólidos suspensos coloidais, que causam turbidez, provoca um agregamento produzindo grandes e densos flocos. Por isso, ele tem a finalidade de aglutinar as partículas finas presentes na água, originando partículas maiores, para facilitar a sedimentação dos sólidos e reduzir a turbidez da água.

O sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$ que pertencente ao grupo dos sais metálicos compostos por alumínio (considerado um coagulante diretor conforme Franco, 2009) é composto químico que possui tanto um baixo custo, como um ótimo desempenho na remoção da turbidez, de microrganismos. Outra vantagem na utilização desse composto é a sua facilidade de manuseio (MEDEIROS, 2015, P. 43).

O *Jar test* é o equipamento, por meio do qual, permite a realização de ensaios para se determinar o percentual de coagulante a ser utilizado na etapa do processo de coagulação/floculação, em ETAs. Por alterar fisicamente e quimicamente o aspecto das partículas presentes na água, a coagulação é comprovada por meio dos ensaios de turbidez e cor, por meio do *Jar Test*.

No processo de coagulação-floculação é preciso que haja o Tempo de Mistura Rápida (TMR) que proporciona a dispersão do coagulante no meio favorecendo a coagulação, que acontece de forma rápida em agitação intensa. Já o Tempo de Mistura Lenta (TML) que favorece a floculação conta com menor agitação e um tempo maior de mistura.

A injeção do Sulfato de Alumínio em uma ETA ocorre na entrada da água no processo, que em uma ETA do tipo convecional se faz na calha parshal, mas em uma ETA do tipo compacta, ocorre na câmara de carga. Foi na ETA do distrito Piau (Piranhas – AL), que se enquadra nesse último tipo de ETA – onde ocorreu o desenvolvimento do tijolo ecológico utilizando o resíduo lodo da mesma.

Na ETA do distrito Piau (Piranhas – AL), onde se desenvolveu a etapa experimental

da pesquisa, a retenção dos flocos formados na água em tratamento ocorre por meio do sistema de dupla filtração, que compreende a filtração ascendente e descendente, através de areia grossa ou seixos no leito filtrante (DI BERNARDO et al. 2005). Já a separação dos flocos da água de lavagem ocorrem em tanques de decantação como apresenta a figura abaixo.

Após essa etapa a água filtrada é posta em contato com cloro a fim de eliminar todas as formas de patógenos causadores de problemas para a saúde humana. Entretanto, as impurezas retidas nos filtros são retiradas periodicamente por meio do sistema lavagem de filtros, que durante esta operação, as envia para os tanques de decantação por meio da água de lavagem, onde recebe outra injeção de sulfato de alumínio para acelerar a decantação do lodo, como mostra a figura a seguir.

Figura 2.24 – Flocos de lodo, em decantação, que após a secagem será utilizado na composição do tijolo.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

O lodo produzido pelo leito de secagem da ETA possui inicialmente alto teor de umidade. À proporção que o mesmo fica exposto ao sol na área externa da Estação, por volta de 48 horas, ocorre o processo de desumidificação total. Na figura a seguir, são vistas 5 células de leito de secagem com fragmentos do lodo seco.

Figura 2.25 – 5 células de leito de secagem, através das quais foi produzido o lodo de ETA.

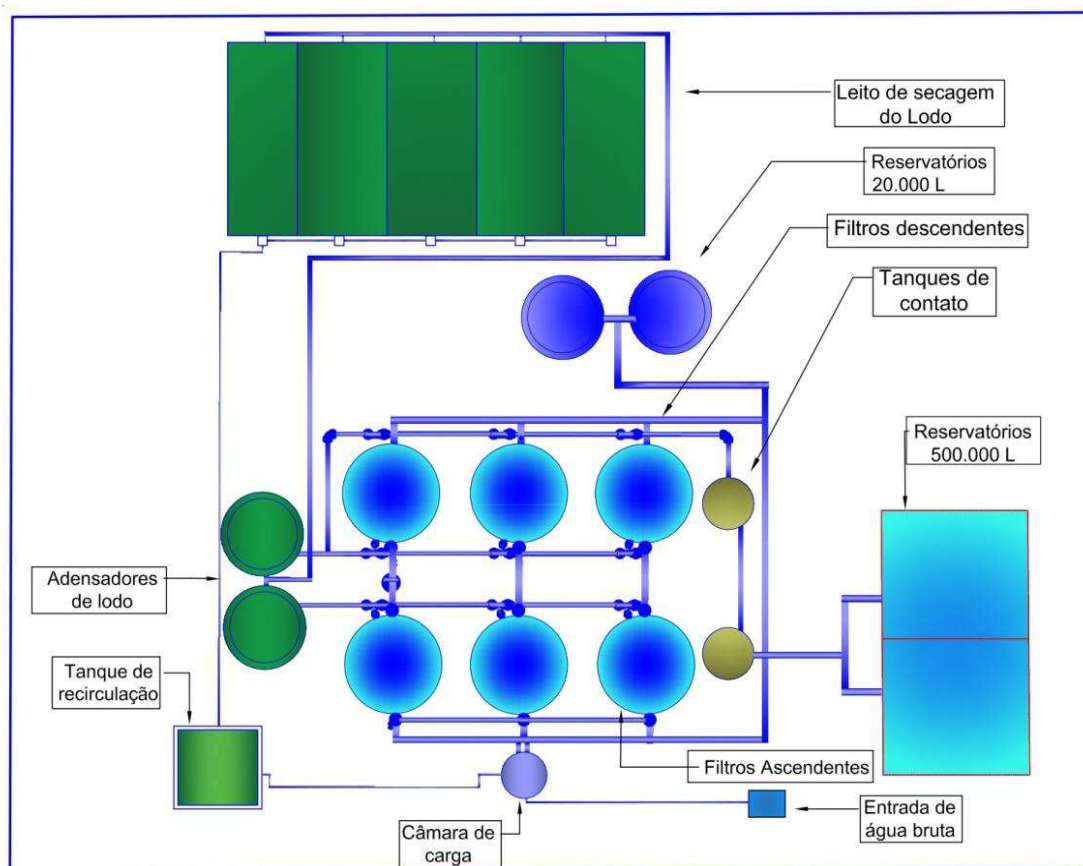


Fonte: Acervo do autor, 2023.

O resíduo utilizado na composição do tijolo é proveniente da lavagem dos 6 filtros presentes nos sistema de tratamento, constituindo-se uma etapa de grande importância no processo de tratamento da água. Nessa ETA, a lavagem dos filtros ocorre com frequência, sempre uma vez por semana com água armazenada em reservatórios elevados de 20 000 L.

Após a passagem da água de lavagem pelos tanques de decantação, onde se adiciona o coagulante Sulfato de alumínio $Al_2(OH)_3$, a única corrente de saída, rica em lodo, é direcionada para as células de leito de secagem, onde água em excesso se infiltra pelo leito e o lodo se mantém na superfície do leito.

Figura 2.26 – Esquema do Sistema de Tratamento de Água da estação da qual utilizou-se o lodo na composição do bloco cerâmico.



Fonte: Santos, 2023.

As fontes de água para consumo humano disponíveis para abastecer as zonas urbana e rural do distrito Piau são bastante escassas, devido estarem situados no semiárido brasileiro, mas precisamente no sertão alagoano, onde a temperatura é elevada e o regime pluvial é bastante irregular. Por isso, o rio São Francisco tem se tornado a única alternativa de abastecimento hídrico da região.

Os dados de projeto básico do sistema de abastecimento de água da ETA em estudo, fornecidos pelo acervo da CASAL, explana alguns dos parâmetros que esse sistema de tratamento de água deve atender em sua forma eficiente de atuação. A tabela 2.5 exhibe os limites definidos em projeto para cada parâmetro.

Tabela 2.5 – Parâmetros de água bruta para os quais a ETA foi projetada.

Parâmetros limites	
Amônia	< 1,2 mg/l
Cloretos	< 250 mg/l
Cloro Residual Livre	0,2 – 2,0 mg/l
Cor Aparente	< 15,0 mg/l
Dureza Total	< 500,0 mg/l
Ferro Total	< 0,3 mg/l
Nitrato	< 10,0 mg/l
Nitrito	< 1,0 mg/l
Sódio	< 200 mg/l
Sólidos Totais Dissolvidos	< 1000,0 mg/l
Sulfato	< 250 mg/l
Turbidez	<5,0 NTU
PH	6-8

Fonte: Santos, 2023.

A origem do lodo utilizado na composição do tijolo ecológico em desenvolvimento, que busca atender aos critérios que assitem a classificação de tijolo do tipo ecológico (NBR 8491), é proveniente do processo de tratamento de água desta estação. Levando este questionamento em consideração, verifica-se a relevância de se reduzir o impacto ambiental e estimular a sustentabilidade utilizando o lodo da ETA.

O lodo gerado nesta ETA possui em sua composição o alumínio Al proveniente da adição de sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$ à água de lavagem dos filtros para acelerar a decantação do lodo, nos tanques decantação. Em seguida, a secagem do lodo ocorre no leito de secagem através da luz solar, a céu aberto. Vale ressaltar que o alumínio é capaz de aumentar a resistência do tijolo quando adicionado à massa argilosa, já a matéria orgânica presente no lodo diminui a resistência do mesmo. Por isso a necessidade do estudo para saber a concentração ótima do lodo, que contém sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$, a ser adicionado na massa argilosa.

O aproveitamento do potencial solar na presente circunstância é extremamente valioso, já que a energia solar não é somente utilizada no processo de secagem do lodo, mas é também no fornecimento de energia elétrica para toda estação, por meio de placas solares

geradoras de energia elétrica. Sendo a energia solar um recurso renovável e que não poluidor, o seu uso se adequa ao presente contexto de utilização de energias renováveis de forma necessária e pertinente (COSTA, 2008).

Figura 2.27 – Placas fotovoltaicas responsáveis não só pela alimentação de energia elétrica da ETA, mas também pela alimentação da estufa utilizada na secagem dos tijolos no laboratório da ETA, Piranhas (AL)



Fonte: Acervo do autor, 2023.

A eliminação da água do lodo no leito de secagem ocorre pelos processos de infiltração e de evaporação. Por meio da infiltração no leito de secagem, a água proveniente do lodo é conduzida, através da gravidade, para um reservatório chamado tanque de recirculação, que por meio de uma bomba, é reinserida na câmara de carga, onde é novamente utilizada, sem gerar prejuízos ambientais, evitando desperdício.

Conforme Dabaieh *et al.* (2020), as emissões de carbono emitidas no processo de fornecimento de calor por meio da queima de matéria orgânica são consideravelmente prejudiciais ao meio ambiente. Por conseguinte, o autor supracitado calcula a energia consumida entre os dois processos de fabricação do tijolo: desumidificação por meio da energia solar, por exposição; e o cozimento tradicional em fornos para este fim.

Avaliando o impacto ambiental ocasionado pelas duas formas diferentes de produção bloco cerâmico/tijolo (desumidificação por meio da energia solar, por exposição; cozimento tradicional em fornos) Dabaieh *et al.* (2020) chega a seguinte conclusão: ocorre uma redução

de até 5.907 kg em emissões de CO₂ para cada 1.000 tijolos produzidos, caso os blocos cerâmicos sejam desumidificados com o calor proveniente da energia solar.

Vale ressaltar que, com base em Dabaieh et al. (2020), ocorre uma redução de aproximadamente 6.000 kg em emissões de CO₂ para cada 1.000 tijolos ecológicos produzidos pelo processo de desenvolvimento de tijolo ecológico desta tese, já que não foi utilizada nenhuma forma de produção de calor por meio da combustão de matéria orgânica, sendo a origem da energia utilizada na estufa de secagem a energia solar.

3. METODOLOGIA

Primeiramente a metodologia desta tese retrata a realização da simulação numérica da secagem do tijolo em estufa utilizada para melhor analisar os processos físicos de transferência de calor/massa utilizando as leis de Fick e Fourier.

A confirmação/validação do modelo desenvolvido neste trabalho se deu por meio da análise comparada dos resultados desse com os resultados da tese de Nascimento (2002), que realizou esta secagem de forma experimental.

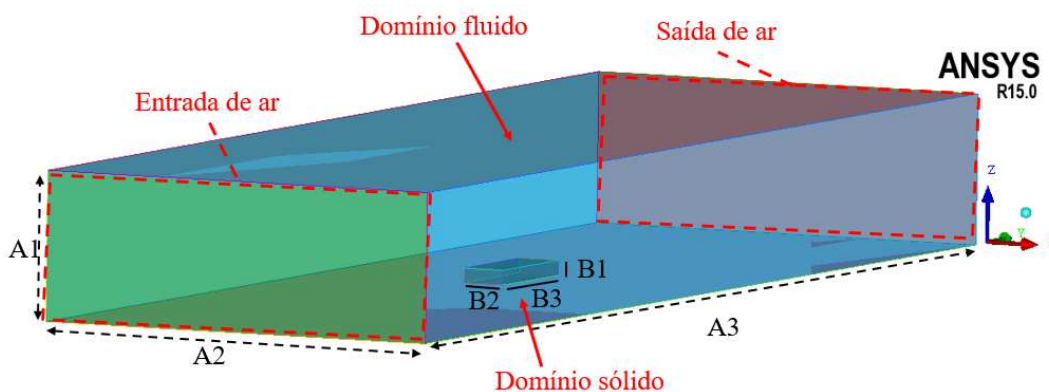
Os parâmetros analisados por comparação com Nascimento (2002) foram: os campos de temperatura, pressão e umidade; variações mássica e térmica; estudo do coeficiente de transporte mássico difusivo; determinação do fator e equação de Arrhenius.

Num segundo momento, realizou-se a confecção do tijolo/bloco cerâmico maciço com o resíduo de lodo de ETA, sem a produção de CO₂, pois a etapa de secagem ocorre em estufa alimentada com energia elétrica de origem fotovoltaica, e a etapa de queima foi eliminada do processo – quesito necessário exigido na NBR 10833 para que o tijolo seja considerado ecológico.

3.1 Domínio computacional

O domínio computacional consiste em um bloco cerâmico (domínio sólido) dentro da estufa (domínio fluido), conforme Fig. 3.1, onde as regiões de entrada e de saída da fase gasosa, juntamente com os dois domínios supracitados são apresentados. As dimensões mencionadas nesta figura estão descritas na Tabela 3.1.

Figura 3.1 – Formas geométricas do modelo utilizado que representa o bloco cerâmico dentro do secador.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Tabela 3.1: Dimensões do domínio computacional

Aresta	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Comprimento	72 mm	200 mm	600 mm	7,06 mm	20,54 mm	60,45 mm

Fonte: Acervo do autor, 2023.

Para a execução da construção geométrica, foi gerada uma malha hexaédrica, que passou por vários processos de refinamento, a fim de avaliar qual a influência da quantidade de elementos na solução numérica. A Tabela 3.2 exibe os números de nós de cada aresta em cada refino e de elementos de cada malha, como se pode constatar na Figura 3.2.

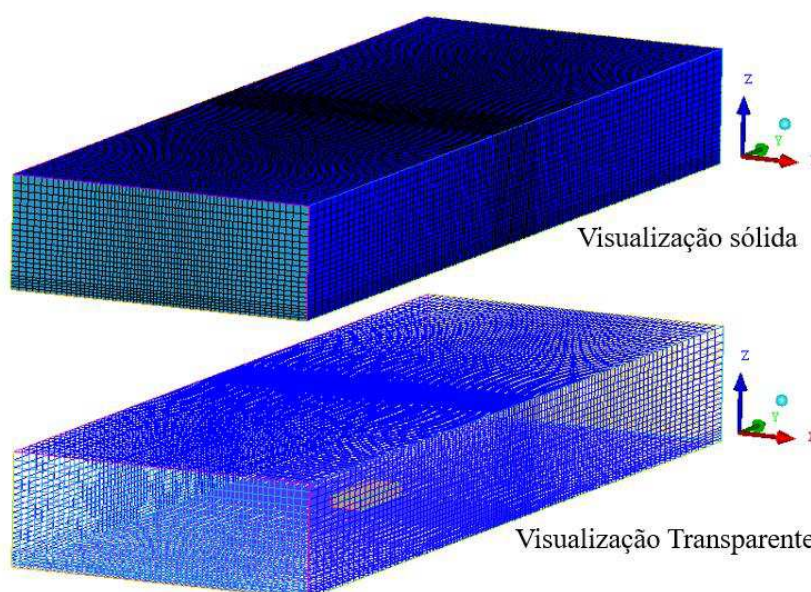
Tabela 3.2: Refinamentos das malhas

Aresta		Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
Nº de nós	A1	16	18	21	22	25
	A2	31	45	67	68	70
	A3	92	106	120	123	133
	B1	4	4	4	5	6
	B2	5	7	9	10	12
	B3	14	18	22	25	27
Nº de elementos		43680	83160	164934	179828	227700

Fonte: Acervo do autor, 2023.

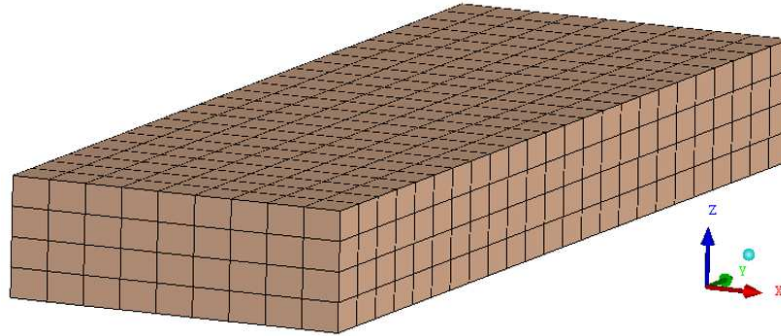
A Fig. 3.2 ilustra o produto do processo de refino da Malha 4 sobre o domínio computacional e a Fig. 3.3 os detalhes do refinamento sobre o bloco cerâmico.

Figura 3.2: Domínio computacional refinado. Fonte: Acervo do autor, 2023.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 3.3: Detalhe de refinamento sobre o bloco cerâmico. Fonte: Acervo do autor, 2023.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

3.2 Modelagem matemática

3.2.1 Equações governantes

3.2.1.1 Domínio sólido

A massa líquida, introduzida na fase sólida e na fase fluida, é tratada como variável adicional. Deste modo temos a relação equacional de conservação mássica:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ms} \Delta m) \quad (3.1)$$

onde m é a massa de água no material e D_{ms} é o coeficiente de difusão mássico no sólido. Da mesma forma, a relação equacional de conservação calorífica:

$$\frac{\partial (\rho_s h_s)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) \quad (3.2)$$

onde 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.

3.2.1.2 Domínio fluido

A relação equacional de quantidade de movimento é:

$$\frac{\partial (\rho_f \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U} \mathbf{U}) = \nabla p + \nabla \cdot \{ \mu_{eff} [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T] \} \quad (3.3)$$

onde ∇p é o gradiente de pressão e μ_{eff} é a viscosidade dinâmica efetiva.

Relação equacional de conservação mássica da fase gasosa:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U}) = 0 \quad (3.4)$$

Em que ρ_f é a densidade do ar e \mathbf{U} é a velocidade do ar dentro da estufa.

A relação equacional de conservação mássica de líquido:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (m\mathbf{U}) = \nabla \cdot (D_{mf}\Delta m) \quad (3.5)$$

Em que D_{mf} é o coeficiente difusivo mássico de água na fase gasosa.

A relação equacional da energia, considerando que o fluido se move a baixa velocidade, é:

$$\frac{\partial (\rho_f h_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U} h_f) = \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) \quad (3.6)$$

Sabe-se que λ_f é a condutividade térmica, h_f é a entalpia e T_f é a temperatura do ar.

A utilização das equações provenientes do modelo de turbulência κ - ε se fez necessária para a descrição dos fenômenos. Nesse modelo envolveu-se a viscosidade da fase gasosa representada abaixo:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.7)$$

Onde μ_t é a viscosidade turbulenta, sendo dada a seguir:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

Onde C_μ tem valor constante de 0,09, e κ - ε representam, respectivamente, a energia cinética turbulenta e a taxa dissipativa energética.

Os parâmetros κ e ε são obtidos a partir da solução das seguintes equações (Ansys, 2015):

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

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1} P_\kappa - C_{\varepsilon 2} P_\varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\kappa b}) \quad (3.10)$$

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 elaboram as forças de campo no modelo.

3.2.1.3 A Interface formada pelos domínios da fase fluida e sólida

A interface, onde ocorre a troca entre os domínios foi regida pelos fluxos conservativos: mássico e energético. Na presente modelagem numérica, a água foi o elemento de trocado entre as fases, enquadrada como variável adicional na modelagem numérica.

Este modelo de utilização de variável adicional com aplicação na secagem de materiais cerâmicos foi desenvolvido e utilizado por Araújo (2019) e Santos (2019), que considera a água como único elemento em difusão pelo domínio sólido, interface e domínio fluido. A difusão pelo domínio fluido ocorre por meio da convecção, caracterizando uma condição de contorno de terceira espécie/ordem.

Neste modelo, a água situada na zona da interface, caracterizada pela camada superficial do sólido e camada limite do gás, representa a transição de moléculas de água do domínio sólido para o gasoso. O fluxo na interface é isento de perda:

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

Onde $m_{\text{interface}}$ e $m_{\text{eq-interface}}$ representam, respectivamente, a massa aquosa na camada superficial e a mesma em condições de equilíbrio. Já o coeficiente de transporte mássico convectivo é representado por h_m .

Na análise energética, o transporte de calor possui sentido inverso quando comparado ao transporte mássico. Por conseguinte, os fluxos de convectivos caloríficos nos dois domínios possuem os mesmos valores. Esta troca ocorre por meio da interface onde não há perda de massa e energia:

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

A condutividade térmica da fase gasosa supracitada, representada por λ_f , e o coeficiente de transporte calorífico por convecção, representado por h_C . $T_{\text{interface}}$ e $T_{\text{eq-interface}}$ são, respectivamente as temperaturas interfacial em qualquer instante e no equilíbrio.

3.2.2 Condições adotadas e variáveis envolvidas

1. Fluxo conservativo mássico e energético na interface;
2. Superfície de entrada no secador:

- a. vazão de massa da fase gasosa, $\dot{m}_{\text{ar seco}}$;
 - b. vazão de massa da fase líquida, \dot{m}_{agua} ;
3. Superfície de saída do secador: pressão do sistema, P;
 4. Superfícies laterais do secador: superfícies lisa e adiabática;
 5. Condição de contorno inicial:

Domínio sólido:

- a. Massa líquida inicial, m_{s_in} ;
- b. Temperatura inicial, T_{s_in} ;

Domínio fluido:

- c. Massa líquida inicial, m_{f_in} ;
- d. Temperatura inicial, T_{f_in} ;

3.2.3 Parâmetros físico-químicos das fases fluidas e sólida

As propriedades adotadas que permitem o modelo representar o processo de secagem, onde a fases sólida (bloco cerâmico) e gasosa (ar quente) são descritas na Tabela 3.3, bem como suas respectivas fontes.

Tabela 3.3: Refinamentos das malhas

	Domínio sólido	Domínio fluido
Massa específica [kg/m ³]	1985,8*	0,56 a 60°C
		0,52 a 80°C
		0,45 a 110°C
Calor específico [J/(kg/K)]	1673*	1004,4
Condutividade térmica [W/(m.K)]	1,675**	0,0261
Viscosidade dinâmica [kg/(m.s)]	-	1,831x10 ⁻⁵

Fonte: * Almeida (2009), **Çengel e Ghajar (2012).

3.3 Casos simulados

A fim de averiguar a relação da dependência dos resultados com a quantidade de elementos presente na malha que representa os domínios em questão, foi realizada a simulação da secagem para a temperatura de 60°C, estando as condições iniciais descritas na Tabela 3.4

Tabela 3.4: Condições iniciais para a execução da testagem de dependência de malha.

Temperatura do ar de secagem [°C] *	60
-------------------------------------	----

Difusividade da umidade no tijolo [m ² /s] *	0,233x10 ⁻⁸
Temperatura inicial do tijolo [°C] *	27,42
Umidade relativa do ar [%] *	10,1
Velocidade do ar [m/s] *	0,1
Massa de água inicial no tijolo [g]*	1,75
Massa de água inicial na estufa [g]**	0,11536
Vazão mássica do ar [g/s] **	1,52579
Vazão mássica do vapor [g/s] **	0,01925
Coefficiente de difusão da umidade no ar [m ² /s] **	2,8948x10 ⁻⁵
Tempo total de secagem [min]*	270

Fonte: *Nascimento (2002), **Estimado.

3.3.1 Tratamento

O presente tratamento estatístico abrange a testagem de dependência da malha, e o cálculo do desvio entre os valores experimentais e os numéricos. Foram utilizadas duas formas de cálculo para estimar o quão longe estão os valores numericamente obtidos com relação aos valores experimentais.

3.3.1.1 Erro médio

Este conceito de erro médio E_m estima diretamente a distância entre e os valores esperados (experimentais) e os obtidos (numéricos):

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

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

3.3.1.2 Erro relativo

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

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

Sendo que a variância dos quadrados dos resíduos (δV^2) pode ser encontrada por:

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

Sabendo que n_p corresponde ao número de parâmetros ajustados – número de graus de liberdade – como utilizado em Silva (2009) e Araújo (2019).

O coeficiente difusivo das partículas líquidas na fase gasosa foi inicialmente estabelecido e posteriormente recalculado durante a modelagem numérica de acordo com a mudança de temperatura e umidade do ar quente de secagem.

3.3.2 Sobre o coeficiente de transporte mássico convectivo

Após estimar o coeficiente de transporte mássico dentro da fase sólida, é dado continuidade ao cálculo do valor médio do coeficiente de transporte mássico convectivo para cada simulação.

O coeficiente de transporte mássico é calculado levando-se em conta a forma geométrica. Para o eixo Z, a Equação 3.11 é escrita na forma:

$$-D_{mf} \frac{\partial m_{\text{interface}}}{\partial z} = h_m (m_{\text{interface}} - m_{\text{eq-interface}}) \quad (3.16)$$

Onde D_{mf} [m^2/s] é o coeficiente de transporte mássico do líquido na fase gasosa; $m_{\text{interface}}$ [g] é a massa líquida na interface em qualquer tempo; $m_{\text{eq-interface}}$ [g] é a massa líquida no equilíbrio; h_m [m/s] é o coeficiente convectivo mássico do líquido na fase gasosa.

3.3.3 Coeficiente mássico difusivo e sua relação com a temperatura

Sabe-se, como é de consenso por diversas fontes como Cremasco (1998), que o coeficiente mássico difusivo do líquido depende substancialmente da temperatura, representada pela equação de Arrhenius (Corrêa *et. al.*, 2006):

$$D_{ms} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3.17)$$

Onde R [kJ/(kmol.K)] é a constante dos gases; E_a [kJ/mol] é a energia de ativação para a difusão; D_0 [m^2/s] é o fator de Arrhenius; T [K] é a temperatura.

A solução da relação equacional acima é atingida por meio do uso do Log natural, aonde se chega à seguinte relação equacional:

$$\ln D_{ms} = \left(-\frac{E_a}{R} \right) \frac{1}{T} + \ln D_0 \quad (3.18)$$

Por conseguinte, foi realizada uma linha de tendência pré-definida do tipo linear em $f(x) = a \cdot x + b$, função afim. A linha de tendência é calculada de maneira que a soma dos quadrados dos resíduos (método dos mínimos quadrados) seja a menor possível, e que possam ser determinados os coeficientes “a” e “b” que melhor se ajustam a reta.

3.4 Desenvolvimento do tijolo ecológico: Materiais e métodos

3.4.1 Materiais

- Fôrma paralelepipedica retangular utilizada para a moldagem do tijolo. Suas proporções tiveram como referência a NBR 16814, com as medidas prescritas na norma brasileira NBR 7170.

Figura 3.4 – Fôrma utilizada para o molde do bloco cerâmico. As medidas são 19,0 cm comprimento, 9,0 cm de largura e 5,7 cm de altura.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

- Fôrma paralelepipedica retangular utilizada para a moldagem do tijolo semelhante as dimensões utilizadas por Nascimento (2002).

Figura 3.5 – Fôrma paralelepípedica retangular utilizada para a moldagem do tijolo semelhante as dimensões utilizadas por Nascimento (2002).

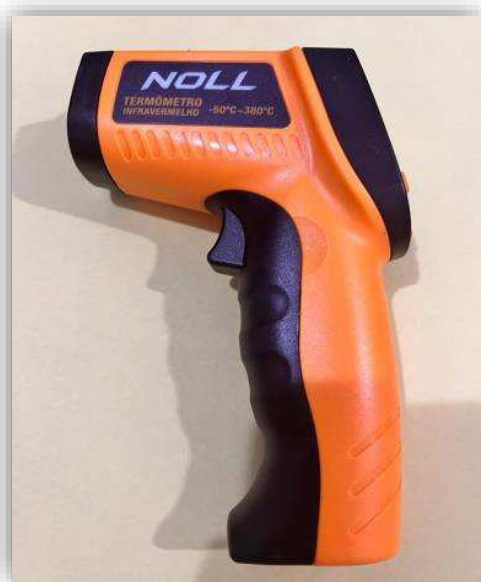


Fonte: Acervo do autor, 2023.

□

- O termômetro infravermelho da marca Noll utilizado no auxílio da medição da temperatura do bloco cerâmico durante a secagem.

Fig. 3.6 - Termômetro Infravermelho utilizado na medição da temperatura na secagem experimental. com faixa de temperatura de -50°C a 380°C .



Fonte: Acervo do autor, 2023 ⁷.

- A Prensa hidráulica automática da marca Fortest foi utilizada para a análise da influência do lodo na composição dos tijolos por meio da determinação da resistência a compressão.

Figura 3.7 – Prensa hidráulica automática disponibilizada pelo Laboratório de Materiais do Campus Sertão da UFAL.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

- A balança analítica da marca Bel foi utilizada para possibilitar a medição das massas das amostras.

Figura 3.8 – Balança analítica utilizada na mensuração da água evaporada da secagem experimental.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

- A estufa de esterilização e secagem com termômetro acoplado da marca Mylabor foi utilizada na secagem do bloco cerâmico.

Figura 3.9 – Estufa de esterilização e secagem utilizada na secagem experimental, com capacidade de aquecimento de até 350°C.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

- O processador do tipo liquidificador da marca Durabrand foi utilizado na trituração dos fragmentos de lodo seco (canto inferior direito – figura abaixo) realizada para produzir um material com possibilidade de homogeneização à massa argilosa (canto inferior esquerdo – figura abaixo).

Figura 3.10 – Processador e lodo antes e depois da trituração.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

- Turbidímetro da marca PoliControl modelo “Turbidímetro AP 2000” para as análises de turbidez das amostras, através do método nefelométrico.

Figura 3.11 – Turbidímetro utilizado nos ensaios para medir a turbidez das amostras.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

- Colorímetro da marca PoliControl modelo “AquaColor Cor” para as análises de cor das amostras, através do método nefelométrico.

Figura 3.12 – Colorímetro utilizado nos ensaios para medir a cor das amostras.



• Fonte: Acervo do autor, 2023.

- Colorímetro da marca PoliControl modelo “AquaColor Cor” para as análises de cor

das amostras, através do método nefelométrico.

Figura 3.13 – Colorímetro utilizado nos ensaios para medir a cor das amostras.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

- pHmêtro portátil da marca BEL utilizado para a medição do parâmetro pH.

Figura 3.14 – pHmêtro portátil Bel utilizado nos ensaios para medir o pH das amostras.



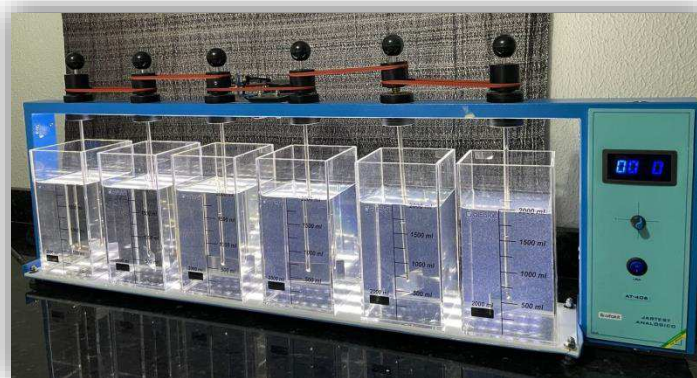
Fonte: Acervo do autor, 2023.

3.4.2 Definição da concentração de Sulfato de Alumínio utilizada na decantação do lodo

O ensaio utilizado para encontrar a dosagem ótima do coagulante sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3]$ a ser inserido na água bruta e na água de lavagem foi realizado por meio do *Jar test*, que consiste num equipamento que permite simular vários floculadores em proporções menores (Lopes et al., 2017, p. 14).

A concentração de coagulante escolhida foi a que melhor apresentou resultados nas análises de cor e turbidez. O equipamento utilizado foi marca Alphakit, e é composto de seis jarros com capacidade de dois litros cada, cada qual contém uma pá giratória para proporcionar agitação.

Figura 3.15 – Equipamento Jar test utilizado no ensaio de determinação da quantidade de Sulfato de Alumínio a ser utilizado no tratamento da água.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Este método foi guiado pela norma NBR 12216, que ao tratar sobre os projetos de tratamento de água, define que o gradiente de velocidade da coagulação precisa estar compreendido entre 10 s^{-1} e 700 s^{-1} e o da floculação deve estar entre 10 s^{-1} e 70 s^{-1} . Passos para o procedimento:

- O procedimento se inicia com a realização da medição de Turbidez, cor e pH da água bruta;
- Em seguida, os seis jarros que compõe o equipamento são preenchidos até o volume máximo, com 2 litros desta água;
- Em seguida o equipamento é ligado em rotação de 20 rpm durante 60 segundos para promover agitação;
- Após esse tempo, a velocidade do equipamento foi alterada para 120 rpm por 2 minutos e com o auxílio de uma pipeta foram acrescentadas quantidades diferentes do coagulante sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3]$ em cada jarro;

- Com o processo de mistura rápida concluído, a velocidade do equipamento é novamente alterada para (30 rpm) por 10 minutos, dando início ao processo de mistura lenta;
- Finalizada essa etapa, interrompeu-se a agitação e o sistema foi deixado em repouso durante 20 minutos para que ocorresse a decantação dos sólidos;
- Em seguida, foi possível visualizar como cada amostra se comportou após o ensaio e realizada novamente a medição de pH, cor e Turbidez da água para então encontrar a dosagem ótima de coagulante a ser utilizada nesse sistema. turbidez de todos os jarro.

A tabela abaixo apresenta as quantidades de coagulante adicionada em cada jarro para a análise de *Jar Test*.

Tabela 3.5 – Quantidade de Sulfato de Alumínio.

Jarro	Quantidade de $[Al_2(SO_4)_3]$ (mL)
1	0,0
2	0,5
3	1,0
4	2,0
5	3,0
6	5,0

Fonte: Acervo do Autor, 2023.

Tabela 3.6 – Turbidez e pH da amostra de água bruta para ensaio no Jar Test.

AMOSTRA	TURBIDEZ (uT)	pH	COR (uC)
Única	3,02	7,01	8,7

Fonte: Acervo do autor, 2023.

Após o ensaio do *Jar Test* foram realizadas novas medições de Cor, pH e Turbidez da água, onde os resultados encontram-se na tabela abaixo. Percebe-se que a amostra 3 na qual foi adicionada 1 mL de sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3]$, teve um melhor rendimento quanto a Cor, Turbidez e pH. Portanto, esta concentração foi utilizada na corrente de sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3]$ adicionada no processo de tratamento da água.

Tabela 3.7 – Turbidez e pH das amostras após o ensaio no Jar Test.

AMOSTRA	TURBIDEZ (uT)	pH	COR (uC)
1	2,42	6,52	8,1
2	0,65	6,29	7,4
3	0,22	6,79	6,9
4	0,98	6,15	8,0
5	1,35	6,62	7,9
6	6,03	5,56	9,3

Fonte: Acervo do autor, 2023.

3.4.3 Definição do estado (úmido/seco) e concentração do lodo na massa argilosa

A definição do tipo de lodo, úmido ou seco, a ser escolhido para compor o material argiloso utilizado no desenvolvimento do tijolo ecológico foi realizada por meio de ensaios de resistência mecânica através da prensa compressora.

O valor da resistência mecânica utilizado como referência para os ensaios dos tijolos produzidos nesta pesquisa foi extraído da norma brasileira NBR 16814 da ABNT para este tipo de bloco, onde se estipula que o mesmo deve possuir uma resistência à compressão individual mínima de 1,5 MPa.

Na primeira etapa foram realizados ensaios de compressão mecânica para definir qual o estado do lodo (úmido/seco) mais adequado a ser utilizado no preparo dos blocos cerâmicos que pavimentarão a segunda etapa. Dentre o lodo úmido e o lodo seco, optou-se pela utilização do lodo seco por apresentar maior capacidade de fornecer resistência ao bloco cerâmico nos ensaios de determinação de resistência mecânica por meio de compressão hidráulica como apresentado no tópico 4.6.2 dos resultados.

Na segunda etapa foram realizados ensaios de compressão mecânica para definir a concentração de lodo com relação à massa total argilosa – massa (g)/massa (g) – que pudesse além de atender a resistência requerida pela NBR 16814 da ABNT, facilitar e viabilizar o reúso deste resíduo sólido para fins de produção industrial de material cerâmico.

Figura 3.16 – Célula do leito de secagem com o lodo no estado semi-sólido, onde a parte pastosa foi retida na parte superior do leito e a parte líquida atravessou por gravidade os blocos aparentes, sendo recolhida em outro tanque.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Validação da quantidade de elementos na construção da malha

As informações referentes à composição mássica do bloco cerâmico obtida de forma empírica por Nascimento (2002) e as obtidas no presente trabalho, mediante de modelagem matemática via CFX, em diferentes instantes do processo de desumidificação a 60°C estão dispostos no Anexo A. Os dados psicrométricos que foram utilizados na alimentação da modelagem matemática estão dispostos no Anexo B.

A confrontação da evolução das composições mássicas do bloco cerâmico mediante a secagem para as várias malhas com diferentes nº de elementos forneceu a possibilidade do cálculo de parâmetros que pudessem sinalizar o quão o refino da malha pode ser relevante. Por conseguinte, seguem na Tab. 4.1 percentuais dos tipos de erros avaliados: Erro médio (E_M) e erro relativo (ERMQ), e o tempo de cada execução do programa para cada malha utilizada. Essas variáveis auxiliarão na escolha da malha mais adequada que será utilizada definitivamente no presente trabalho (MALISKA, 2004).

Pode-se inferir que apesar dos erros serem pequenos, um alto tempo de execução do programa é necessário a malha 5. A diferença entre os erros utilizando-se a malha 5 e a malha 4 é bastante pequena, não chegando a ultrapassar o valor de uma casa decimal. Logo, a diminuição nos erros não compensa o seu resultado quando comparado ao menor tempo de execução do programa utilizando a malha 4. Portanto, utilizou-se a malha 4 para os posteriores casos e estudos com base nesta demonstração dos dados dos testes de malhas presentes na Tab. 4.1.

Vale esclarecer que por conta dos elevados Erros observados nas Malhas 1, 2 e 3 quando confrontadas com as malhas 4 e 5, foi o motivo principal pelo descarte da possibilidade delas.

Tabela 4.1: Dados relativos à execução das malhas 1, 2, 3, 4 e 5.

	Massa [g]		Tempo de execução do programa
	E_M (%)	ERMQ	
1 (43680 elementos)	36,9	0,04	6h e 12min
2 (83160 elementos)	27,9	0,03	11h e 21min
3 (164934 elementos)	23,4	0,02	16h e 38min
4 (179828 elementos)	20,8	0,01	23h e 24min
5 (227700 elementos)	20,0	0,01	28h e 34min

Fonte: acervo do autor, 2023.

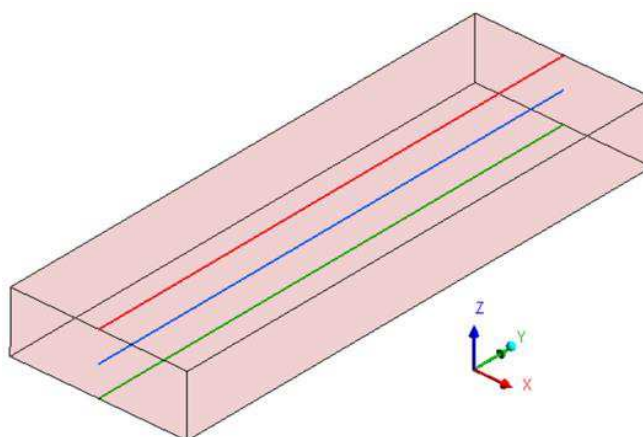
4.2 Avaliação da composição mássica e perfil térmico bloco cerâmico

O perfil térmico e de umidade no bloco cerâmico foi analisado mediante o uso de linhas e planos inseridos no domínio sólido. As posições das linhas e planos foram determinadas objetivando a obtenção de resultados que permitam uma melhor compreensão do processo de desumidificação do bloco cerâmico por meio da avaliação dos perfis térmico e de umidade no bloco cerâmico.

Dessa forma, foram utilizadas 3 linhas ao longo dos eixos X, Y e Z com a finalidade de melhor auxiliar a extração dos resultados do comportamento do bloco cerâmico em processo de desumidificação no secador. A seguir observa-se o bloco cerâmico com suas respectivas linhas (verde, azul e vermelha), bem como uma explicação detalhada das posições dessas linhas.

- Linhas 1, 2, 3: possuem, Fig 4.1, cores azul, vermelha e verde, e estão situadas, respectivamente no centro do bloco ($z = 0,353$ cm), na superfície superior ($z = 0,706$ cm) e na superfície inferior ($z = 0$ cm). Adiante, serão apresentados os perfis das variáveis analisadas por toda a extensão de seu comprimento na direção do eixo Y.

Figura 4.1: Linhas 1, 2 e 3 para análise.

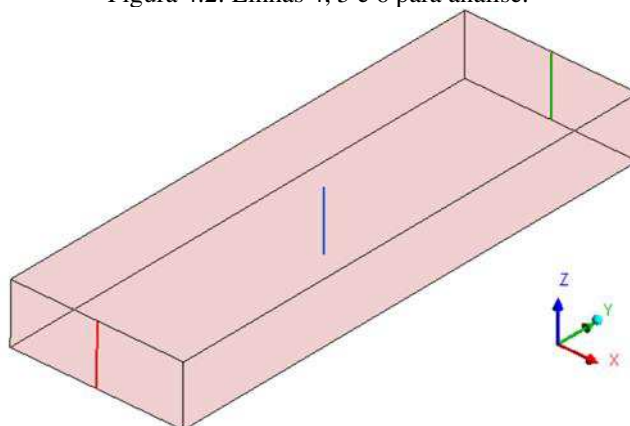


Fonte: acervo do autor, 2023.

- Linhas 4, 5, 6: possuem, Fig 4.2, cores azul, vermelha e verde, e estão situadas, respectivamente no centro ($y = 0$ cm), na superfície lateral negativa na extensão do eixo Y ($y = -3,0225$ cm) e na superfície lateral positiva na extensão do eixo Y ($y =$

3,0225 cm). Adiante, serão apresentados os perfis das variáveis analisadas na extensão do comprimento na direção do eixo Z.

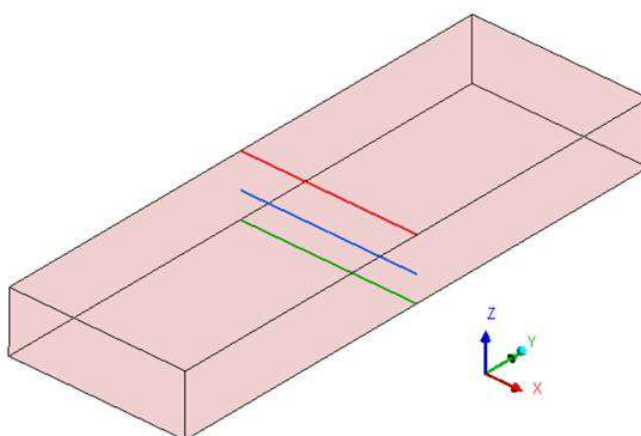
Figura 4.2: Linhas 4, 5 e 6 para análise.



Fonte: acervo do autor, 2023.

- Linhas 7, 8, 9: possuem, Fig 4.3, cores azul, vermelha e verde, e estão situadas, respectivamente no centro do tijolo ($z = 0,353$ cm), na superfície superior do tijolo ao longo do eixo Z ($z = 0,706$ cm) e na superfície inferior do tijolo ao longo do eixo Z ($z = 0$ cm). Adiante, serão apresentados os perfis das variáveis analisadas ao longo do comprimento do tijolo na direção X.

Figura 4.3: Linhas 7, 8 e 9 para análise.



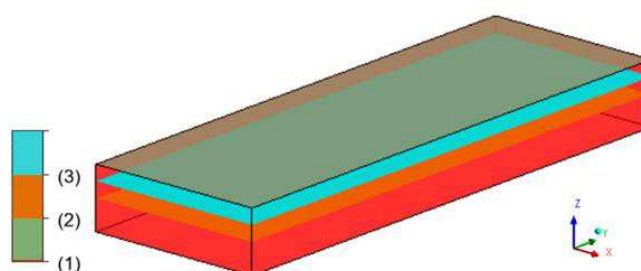
Fonte: acervo do autor, 2023.

Além das linhas já demonstradas, foram utilizados planos no domínio sólido do bloco cerâmico, em posições estratégicas, visando a análise sobre as distribuições dos campos de temperatura e umidade com a finalidade de melhor auxiliar a extração dos resultados. Dessa

forma, foram utilizados 3 planos perpendiculares aos eixos X, Y e Z com a finalidade de melhor auxiliar a extração dos resultados.

Na Fig. 4.4 a seguir, os planos verdes (1), laranja (2) e azul (3) estão situados, respectivamente na superfície superior do bloco ($z = 0,706$ cm), no centro ($z = 0,353$ cm) e no intermédio entre essas duas superfícies: superfície azul (3) ($z = 0,1765$ cm). Adiante, serão apresentados os perfis das variáveis analisadas sobre esses planos perpendiculares ao eixo Z.

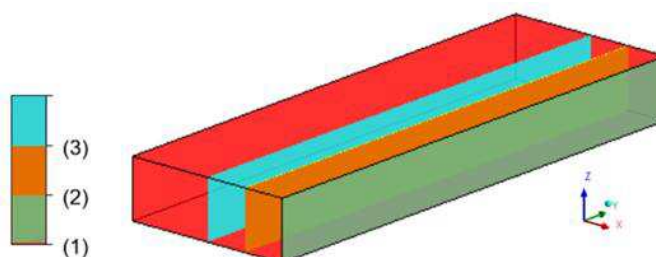
Figura 4.4: Planos sobre os eixos XY para análise.



Fonte: acervo do autor, 2023.

Na Fig. 4.5 a seguir vê-se os planos verde (1), laranja (2) e azul (3), que estão situados, respectivamente na superfície direita do bloco cerâmico, na superfície central ($x = 0,0$ cm) e no intermédio entre essas duas superfícies: superfície laranja (3). Adiante, serão apresentados os perfis das variáveis analisadas sobre esses planos perpendiculares ao eixo X.

Figura 4.5: Planos sobre os eixos YZ para análise.



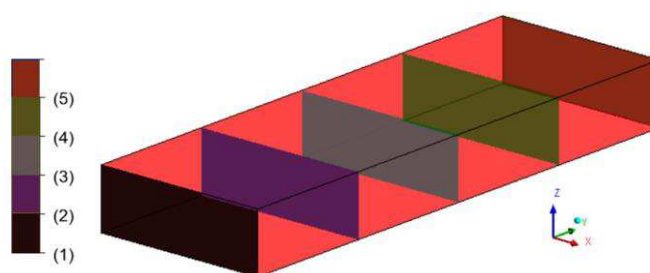
Fonte: acervo do autor, 2023.

É importante ressaltar que os planos XY e YZ retratados nas figuras anteriores, devido as suas posições, tendem a exibir distribuições de umidade e temperatura com tendência à simetria. Entretanto, por conta da não existência de simetria nos planos perpendiculares ao eixo Y, houve a necessidade de se apresentar planos XZ, ortogonais ao eixo Y, de uma extremidade a outra, contemplando ambas as superfícies e três posições no domínio do bloco cerâmico.

Mediante o sentido do fluxo da fase gasosa dentro do secador, na direção do eixo Y, a distribuição de temperatura e umidade ocorre de formas diferenciadas ao longo planos perpendiculares ao eixo Y com relação aos demais planos já retratados anteriormente.

Na Fig. 4.6 a seguir vê-se os planos preto (1), roxo (2) cinza (3), azul (4) e marrom (5), cujas posições são respectivamente em: $y = -3,0225$ cm; $y = -1,51125$ cm; $y = 0$ cm; $y = 1,51125$ cm; $y = 3,0225$ cm. Adiante, serão apresentados os perfis das variáveis analisadas sobre esses planos perpendiculares ao eixo Y.

Figura 4.6: Planos sobre os eixos XZ para análise.



Fonte: acervo do autor, 2023.

Os valores do comportamento térmico e mássico para cada instante da secagem foram confrontados com os resultados empíricos para a operação de secagem a 60°C (Caso 1), 80°C (Caso 2) e 110°C (Caso 3) do amplo estudo realizado por Nascimento (2002). Os tópicos a seguir detalham essas comparações.

a) Difusividade

As estimativas iniciais dos coeficientes de transporte mássico utilizado na simulação numérica foram obtidas a partir de valores situados na Tab. 4.1 abaixo, cuja fonte é proveniente de Nascimento, 2002. A tabela abaixo apresenta os coeficientes de transporte mássico para cada temperatura correspondente, bem como seus respectivos erros relativos e variâncias.

Analisando a Tab. 4.2, é possível realizar algumas observações que nortearam os ajustes com relação às estimativas iniciais dos coeficientes de difusividade, dentre elas a de que a difusividade mássica tende a aumentar com a elevação da temperatura e teor de umidade inicial.

Tabela 4.1: Parâmetros obtidos de Nascimento (2002) em sua pesquisa empírica.

Caso	Tipo de Argila	T _a (°C)	Nascimento (2002) Dx10 ⁺⁸ (m ² /s)	Este Trabalho Dx10 ⁺⁸ (m ² /s)	ERMQ (kg/kg) ²	Variância \bar{s}^2
1	Vermelha	60	0,233	0,22	0,00628346	0,000698162
2	Ball Clay	80	0,357	0,36	0,00840254	0,001200360
3	Vermelha	80	1,296	1,41	0,00846885	0,000940984
4	Vermelha	110	1,520	2,10	0,01079670	0,000830515
5	Ball Clay	110	2,030	2,73	0,02786940	0,003981350

Fonte: Nascimento, 2002.

Sabe-se que a comparação direta dos valores da difusividade mássica pode não ser justa, já que se trata de um parâmetro que pode se alterar em função de outras condições como ar de secagem, forma geométrica do objeto a ser submetido à secagem, natureza do material que compõem este sólido, e modelo e condições de contorno usadas nessa modelagem (Cremasco, 1998).

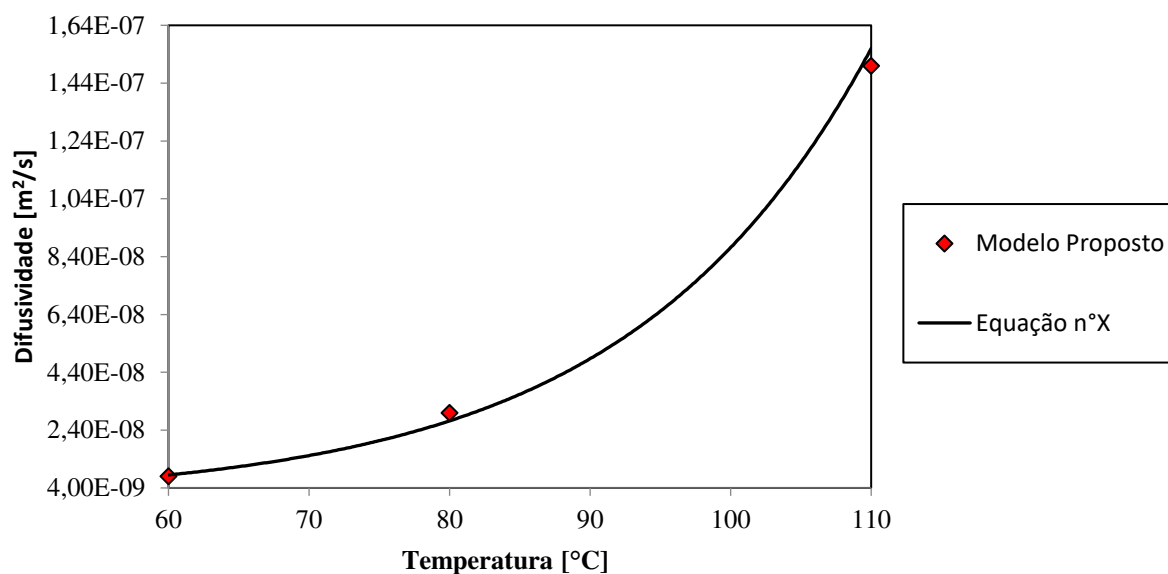
Contudo, Silva (2009), por meio da realização de um estudo sistemático sobre a secagem de blocos de origem cerâmica, chegou a um valor de difusividade mássica de $8,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (80°C), e Santos (2013) ao realizar um estudo sistemático sobre a secagem cerâmica, como telhas, obteve valores de $5,17 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ (80°C).

A difusividade encontrada por meio do modelo proposto nesse trabalho nas condições já apresentadas anteriormente, apresentou valores que podem ser avaliados no gráfico abaixo para as três temperaturas em que Nascimento (2002) realizou seu trabalho experimental.

$$D_{ms} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.1)$$

Apresentada no gráfico abaixo, a curva relaciona a difusividade com a temperatura – com ordens de grandezas semelhantes a diversos trabalhos como Silva (2009), Santos (2013) e Nascimento (2002). Onde R [kJ/(kmol.K)] é a constante dos gases; E_a [kJ/mol] é a energia de ativação para a difusão; D₀ [m²/s] é o fator de Arrhenius; T [K] é a temperatura.

Figura 4.7: O gráfico relaciona a difusividade mássica da água no bloco cerâmico e a temperatura da fase gasosa dentro do secador.

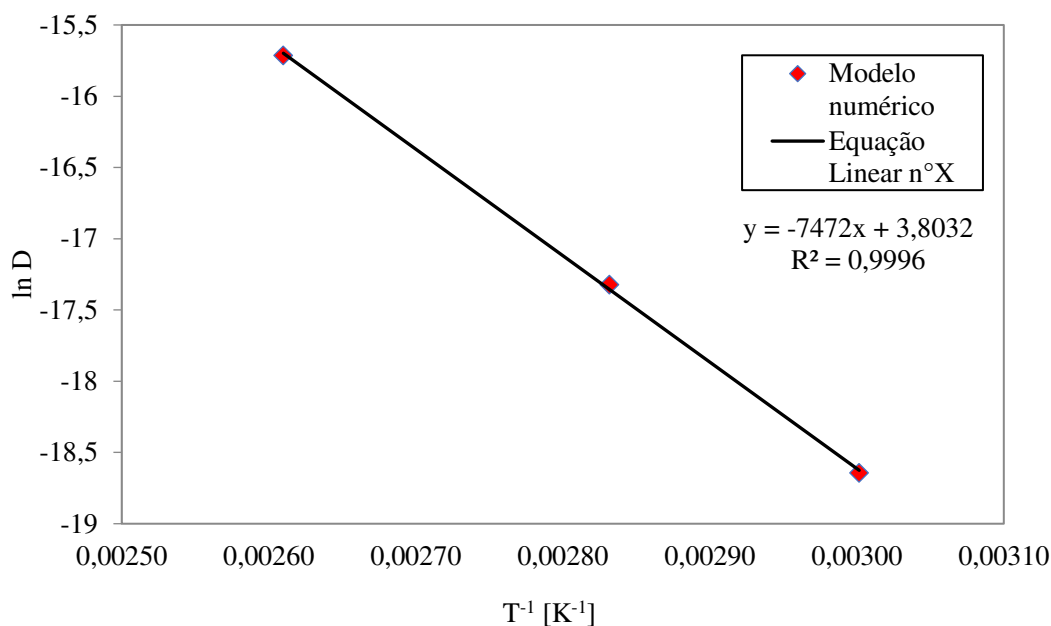


Fonte: acervo do autor, 2023.

A importância da solução da equação exponencial acima é dada pelo fato de por meio dessa, ser possível a determinação do fator de Arrhenius, D_0 [m²/s], e da energia de ativação para a difusão E_a [kJ/mol]. Dessa forma, linearizando a curva em $f(x) = a \cdot x + b$, por meio do Log natural, chega-se à seguinte relação equacional, apresentada no gráfico abaixo juntamente com os valores de seus coeficientes:

$$\ln D_{ms} = \left(-\frac{E_a}{R} \right) \frac{1}{T} + \ln D_0 \quad (4.2)$$

Figura 4.8 – O gráfico relaciona a difusividade mássica no bloco cerâmico e o inverso da temperatura da fase gasosa dentro do secador.



Fonte: acervo do autor, 2023.

b) Evolução térmica do bloco cerâmico

Após análise destas figuras, afirma-se que o fluxo de umidade se dá do centro para superfície concomitantemente com o movimento do fluxo de calor que ocorre no sentido oposto. Vê-se que os maiores gradientes térmicos e mássicos encontram-se nas regiões próximas aos vértices do produto, devido às mesmas estar em contato de forma mais intensa com a fase gasosa. Esses geram respectivamente tensões hídricas e térmicas levando os vértices a se tornarem locais mais susceptíveis ao surgimento de trincas e deformidades, fato também observado por Silva (2009).

Fisicamente, espera-se o surgimento desses fenômenos (trincas e deformidades) mediante à exposição desses vértices a um fluxo mássico maior, que produz uma maior variação de umidade (M^*) e temperatura (θ^*) que se espera. Portanto, é importantíssimo o controle do processo de secagem para que os defeitos sejam eliminados ou minimizados, o que resulta na diminuição de custos para as empresas por meio da redução de perdas energética e matéria prima, e melhoria do controle de qualidade.

4.3 Caso 1 (Argila Vermelha, T=60°C)

4.3.1 Evolução Cinética de Secagem e Aquecimento do bloco cerâmico

A Fig. 4.9 ilustra a comparação entre os resultados preditos, mediante modelagem matemática, e os experimentais de Nascimento (2002) sobre a concentração mássica aquosa média no decurso do processo de desumidificação dos blocos cerâmicos submetidos a uma temperatura de 60°C.

Ao analisar-se a evolução cinética de secagem mediante a Fig. 4.9 vê-se que os resultados numérico e experimental estão bem ajustados indicando uma aproximação satisfatória desde o tempo inicial até o tempo total. Uma análise quantitativa dos dados presentes na Fig. 4.9 foi realizada mediante avaliação estatística a partir dos erros médios e relativos, incluindo variância dos quadrados dos resíduos e correlação de Pearson (Tab. 4.3).

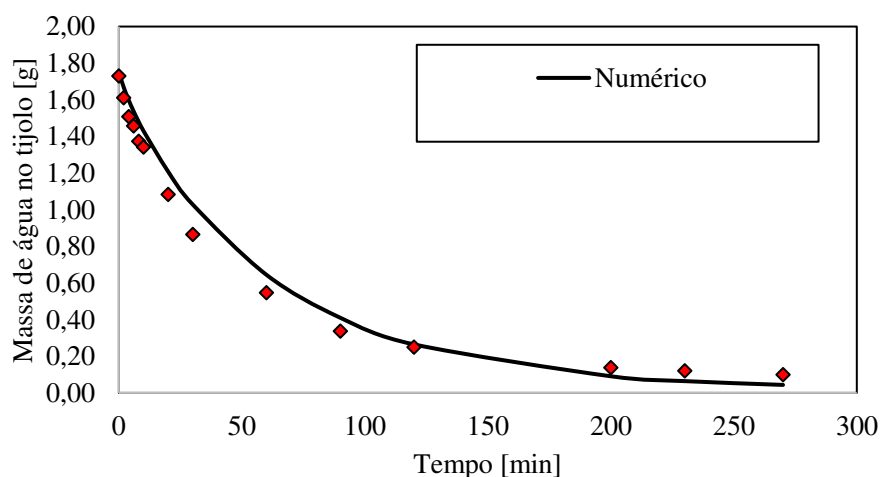
Tabela 4.2: Parâmetros da análise quantitativa para secagem a 60°C.

Temperatura de Secagem a 60°C			
E_m	$ERMQ$	δV	r_p
17,4	0,104	0,008	0,996

Fonte: acervo do autor, 2023.

Dessa forma, pode-se perceber que essa avaliação estatística tende a confirmar o bom ajuste entre os valores numéricos e empíricos, validando a proposta de modelo em questão para essas condições operacionais (T=60°C e umidade relativa=10%).

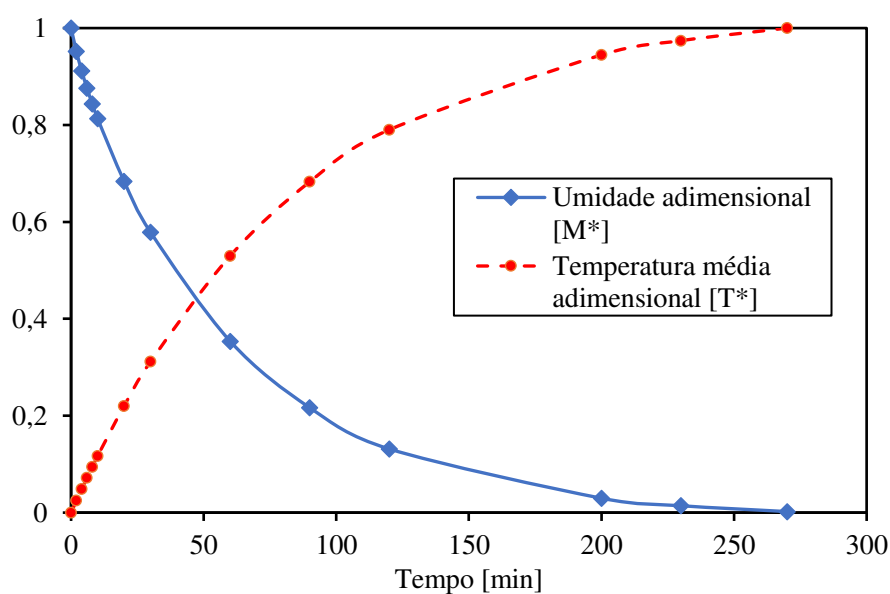
Figura 4.9 – Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade no decurso do tempo (Caso 1).



Fonte: acervo do autor, 2023.

A Figura 4.10 ilustra a variação do teor de umidade adimensional e a temperatura média adimensional, em taxa decrescente, do bloco cerâmico no decurso do tempo, ambas as variáveis obtidas por meio da simulação numérica. Vê-se uma concordância lógica de simetria entre as duas curvas, já que a medida que o bloco recebe calor e aumenta sua temperatura, o mesmo perde massa aquosa diminuindo sua umidade. Vê-se que em aproximadamente 270 minutos, o material atinge seu equilíbrio térmico e mássico.

Figura 4.10 – Predição do teor de umidade médio e temperatura média do bloco cerâmico no decurso do tempo (Caso 1).



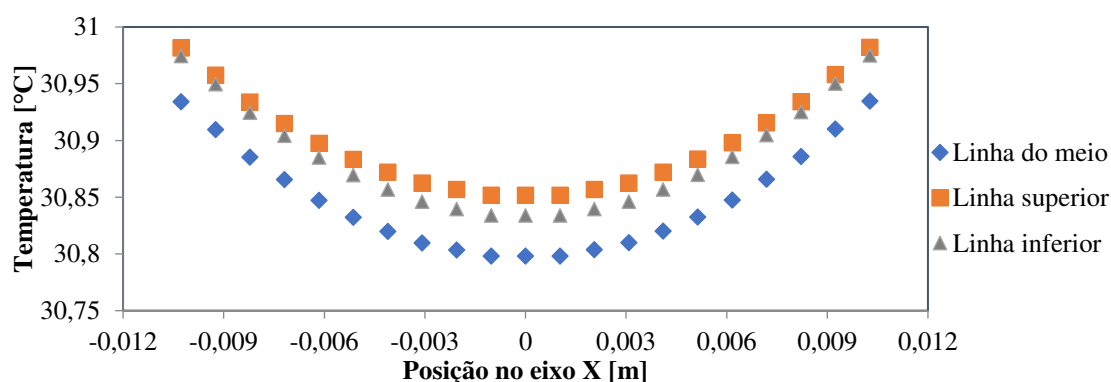
Fonte: acervo do autor, 2023.

4.3.2 Perfil linear de evolução térmica no bloco cerâmico

As distribuições lineares térmicas da Fig. 4.3 para a o processo de desumidificação a 60°C situam-se nas 3 figuras (Fig. 4.11; Fig. 4.12; Fig. 4.13) a seguir, para os instantes de 10, 60 e 270 min. Vê-se que no decurso do eixo X existe uma tendência a um comportamento simétrico da temperatura na extensão do bloco, onde a temperatura é maior nas extremidades deste eixo, ou seja, nas duas superfícies laterais do bloco cerâmico, e menor na posição $x=0$, ou seja, no interior. Contudo, torna-se evidente que no equilíbrio térmico este comportamento parabólico tende a se linearizar.

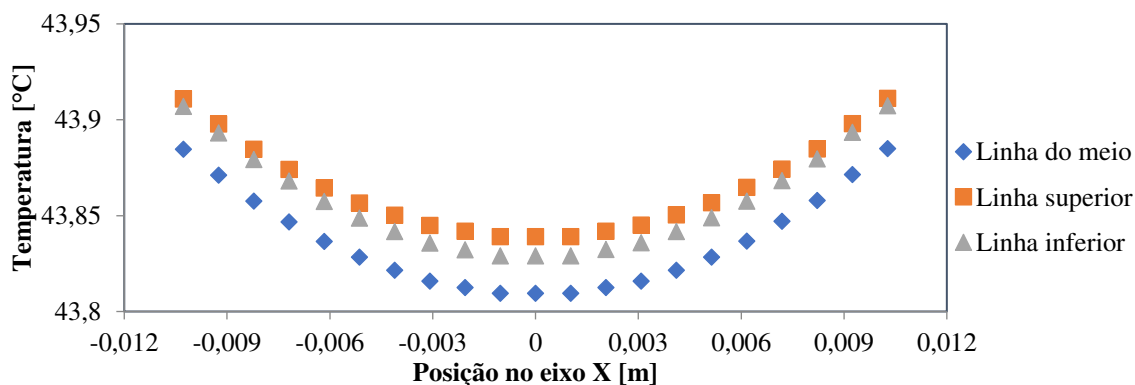
Os gráficos que possuem o formato de uma parábola com concavidade voltada para cima, mostram que os pontos localizados nas extremidades das linhas, ou seja, nas faces do tijolo, atingem mais rapidamente o equilíbrio térmico que a parte interna.

Figura 4.11 – Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=10$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$.



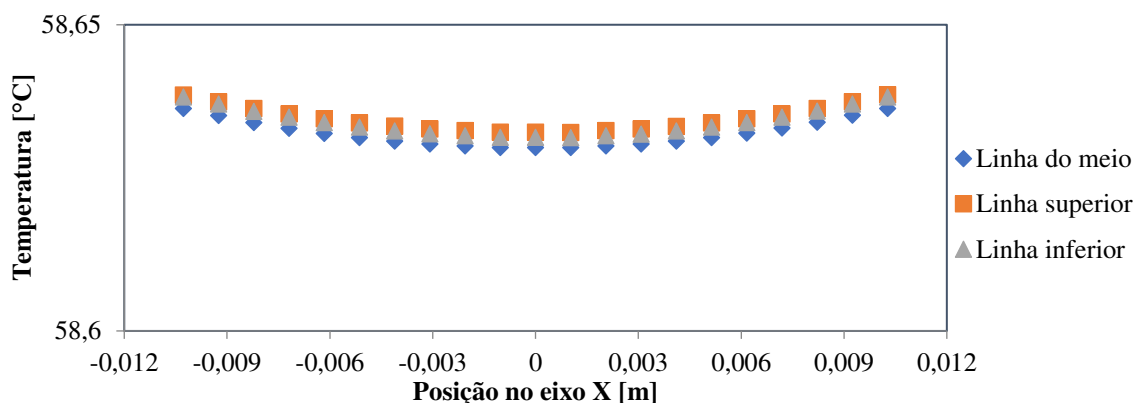
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.8: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=60$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

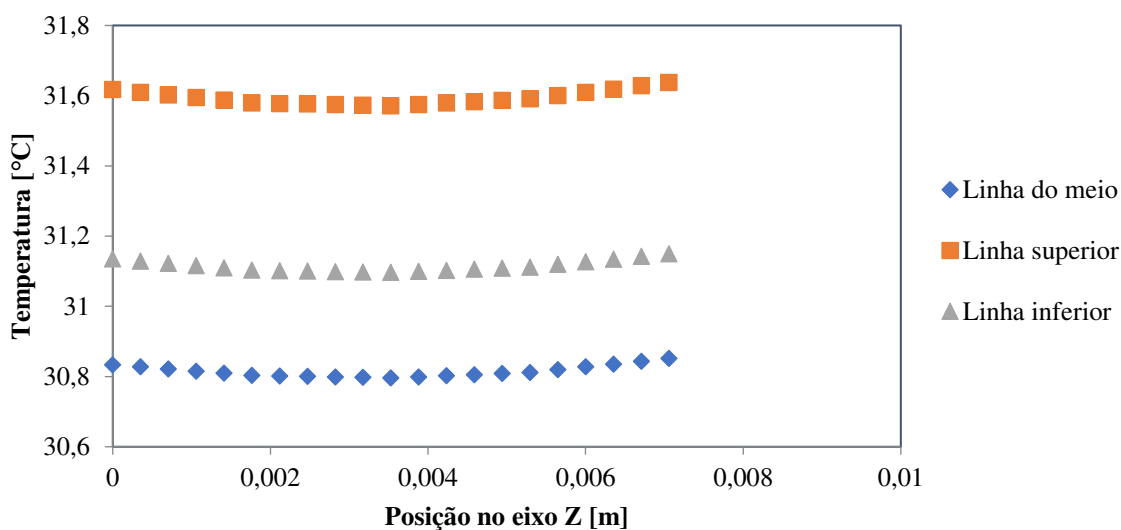
Figura 4.9: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=270$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

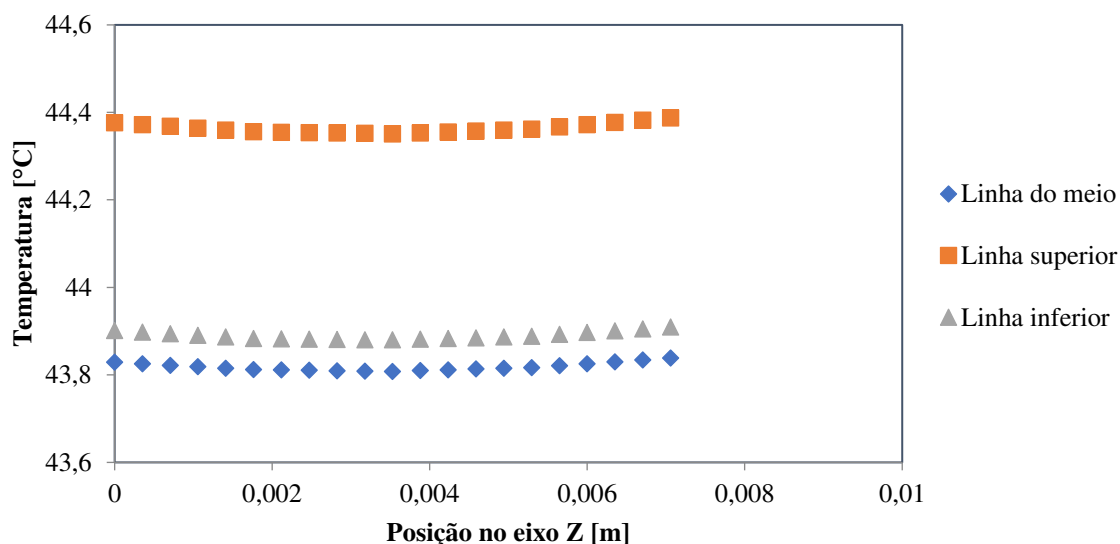
O comportamento térmico nas linhas 4, 5 e 6, Fig. 4.2, para a secagem a 60°C estão presentes 3 figuras a seguir (Fig. 4.14; Fig. 4.15; Fig. 4.16) nos instantes de 10, 60 e 270 min. Por meio dos gráficos, vê-se que o gradiente térmico na extensão da mesma linha é praticamente nulo, motivo provavelmente justificado graças a localização da linha que se encontra perpendicular ao fluxo de ar quente, isso quer dizer que o transporte calorífico acontece simultaneamente em todos os pontos na extensão destas linhas. A linha situada na camada superficial do bloco que se encontra no plano XZ em $y = -3,14551$ se mantém em uma temperatura mais elevada que o restante pelo intenso contato com a fase gasosa quente nessa localidade.

Figura 4.10: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=10$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$.



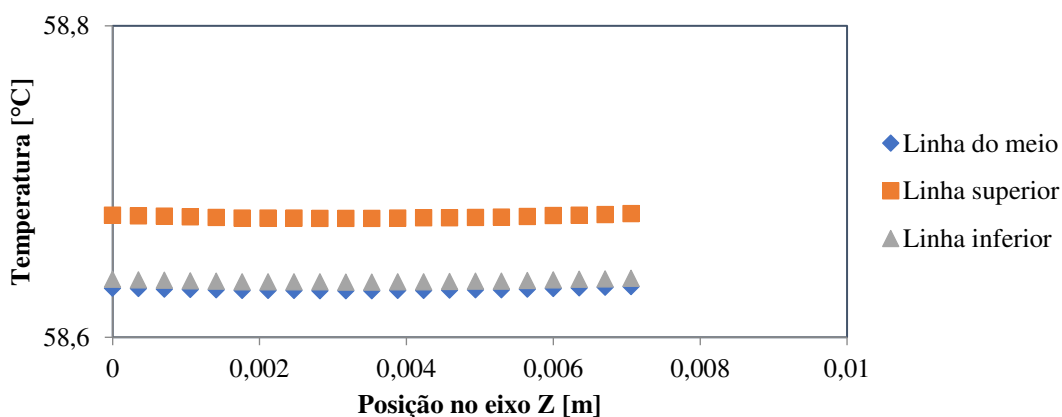
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.11: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=60$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

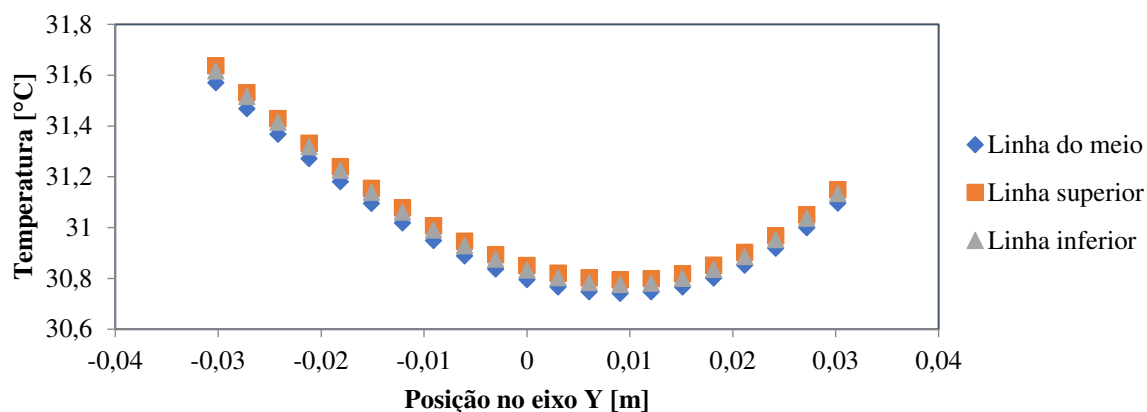
Figura 4.12: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=270$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

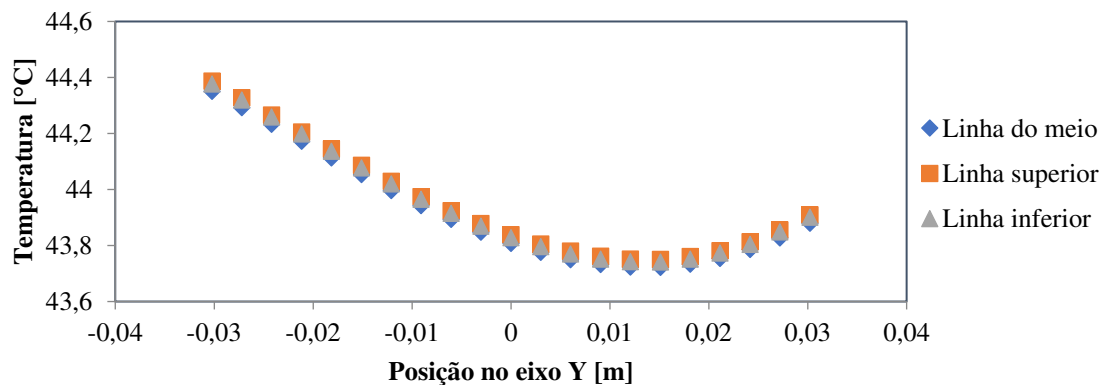
O comportamento térmico nas linhas 7, 8 e 9, Fig. 4.3, na desumidificação a 60°C estão nas 3 figuras a seguir (Fig. 4.17; Fig. 4.18; Fig. 4.19) em 10, 60 e 270 min. Por meio dos gráficos, vê-se que as três linhas tendem a se sobreporem, demonstrando-se bastante semelhantes. Vê-se uma tendência de curva peculiar que se aproxima de uma parábola com concavidade para cima e ponto mínimo deslocado para a direita do bloco cerâmico. Característica não identificada nas linhas das duas anteriores.

Figura 4.13: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=10$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$.



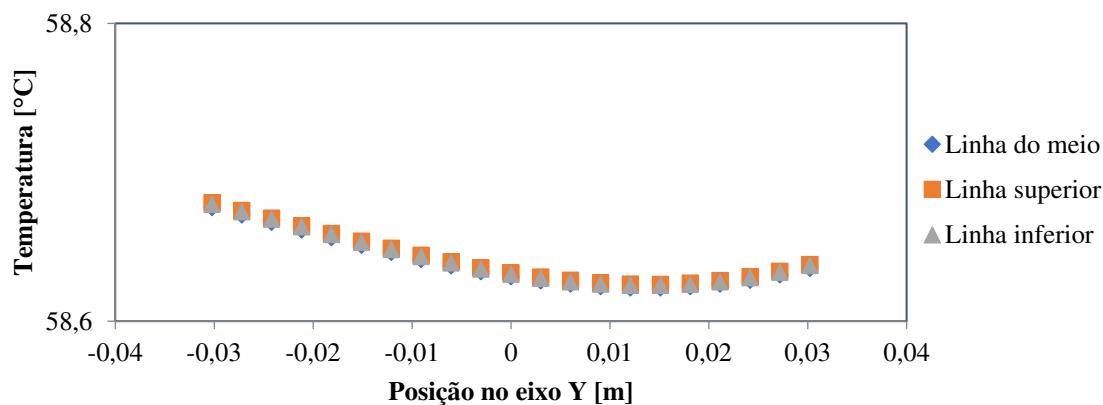
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.14: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=60$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.15: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=270$ min e $T=60^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

4.3.1 Comportamentos térmico e mássico no bloco cerâmico em três planos para $T=60^{\circ}\text{C}$

4.3.1.1 *Análise para os Planos XZ*

Por meio da Fig. 4.6 são apresentados 5 planos, através dos quais foram retratadas as distribuições térmicas (Fig. 4.20; Fig. 4.21; Fig. 4.22; Fig. 4.23; Fig. 4.24) e mássicas (Fig. 4.25; Fig. 4.26; Fig. 4.27; Fig. 4.28; Fig. 4.29) apresentados a seguir. Dessa forma, foi possível observar que, nos planos analisados, o transporte de calor ocorre das camadas superficiais do bloco cerâmico para dentro no material. Vê-se que a variação do comportamento térmico é real, entretanto é pequena, reduzindo assim, as implicações de uma desidratação não uniforme que ao proporcionarem gradientes pequenos de umidade (Tab. 4.4) podem reduzir os riscos de produzir deformações no material, inclusive durante a queimagem.

A superfície do tijolo que se encontra defronte ao sentido da fase gasosa (plano XZ em $y = -3,0225$ cm) possui um comportamento térmico mais elevado que a camada superficial oposta a essa (plano XZ em $y = 3,0225$ cm) como é possível perceber nas Fig. 4.20 e Fig. 4.24. Portanto, devido à assimetria no fornecimento calorífico não é prudente comparar as distribuições simétricas de temperaturas e umidade nos planos XY e YZ, sem que este fato seja levado em conta (SANTOS, 2019).

Devido a este motivo, por conta da falta de simetria presente nos planos perpendiculares ao eixo Y, foram escolhidos cinco planos em posições que intercalam de uma superfície a outra. As posições foram em y igual a $-3,0225$; $-1,51125$ cm; 0 cm; $3,0225$ cm; $1,51125$ cm. O aquecimento assimétrico evidencia que a localização do bloco no secador e o sentido do contato da fase gasosa afetam diretamente o comportamento térmico e, por consequência, o mássico.

Em todo curso da secagem, ou seja, analisados para a $T=60^{\circ}\text{C}$, vê-se que o interior do bloco mantém-se com temperaturas menores que as constatadas nas camadas superficiais, entretanto com umidade maior que as constatadas nas extremidades do bloco. A despeito de existir uma evidente tendência de comportamento térmico e mássico nos planos analisados, vê-se que o diferencial térmico e mássico possuem valores que não são grandes o suficiente para proporcionar riscos de trincas, deformações e fissuras.

As trincas, deformações e fissuras que geralmente são causadas por diferenciais térmicos elevados, ocorrem ao se utilizar condições operacionais inapropriadas como altas temperaturas e elevadas velocidades da fase gasosa, associada a umidades relativamente baixa. Essas condições favorecem um elevado transporte calorífico que associado a um rápido transporte mássico, produz defeitos no material.

Comparando-se os planos XZ desde a superfície negativa ($y = -3,0225$ cm) incluindo a superfície positiva ($y = 3,0225$ cm), vê-se que no início do processo o gradiente térmico tende a diminuir no sentido do eixo Y, mesmo sentido da fase gasosa. Entretanto, quando o equilíbrio térmico e higroscópico é atingido em $t=270$ min, os diferenciais térmicos nos planos citados se igualam no valo de $\Delta T = 0,01^\circ\text{C}$.

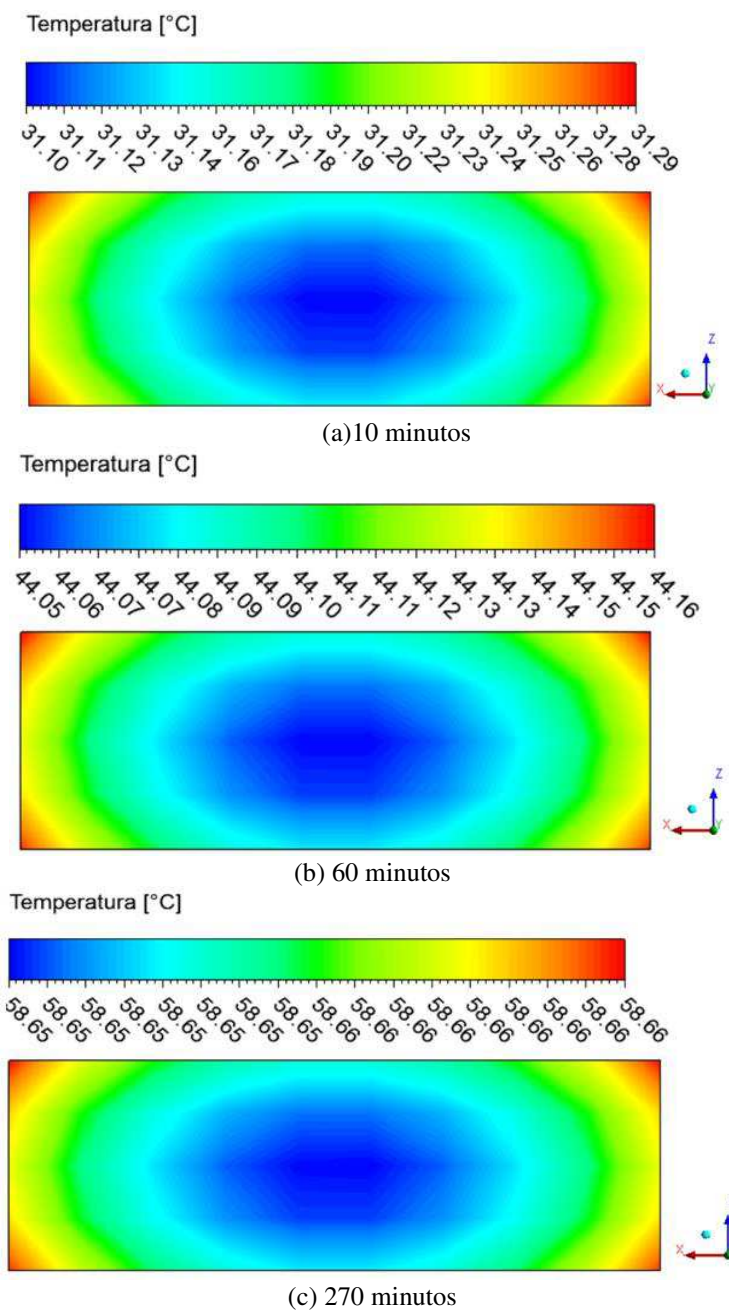
Ao compararmos o gradiente mássico nos planos XZ desde a superfície negativa ($y = -3,0225$ cm) até a superfície positiva ($y = 3,0225$ cm), vê-se que ele tende a ser maior ao aproximar-se das superfícies, mas tende a diminuir nos demais planos com tendência de aproximação no decurso da desidratação.

Tabela 4.3: Gradientes máximos de temperatura teor de umidade nos planos XZ.

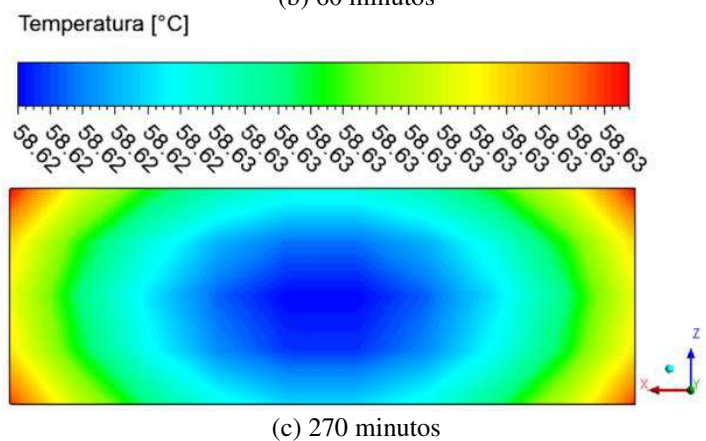
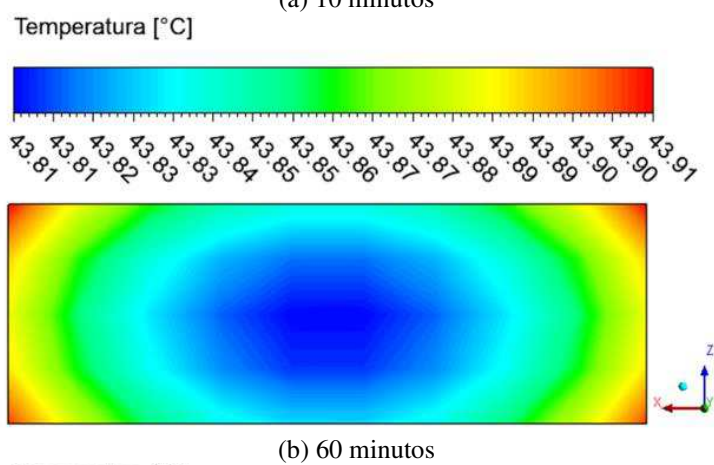
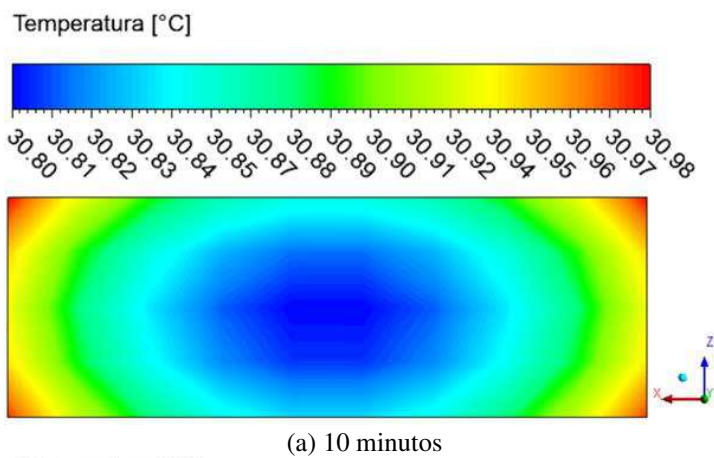
Posição do Plano XZ [cm]	Tempo de Secagem a 60°C					
	10 min		60 min		270 min	
	ΔT [$^\circ\text{C}$]	ΔM [g/g]	ΔT [$^\circ\text{C}$]	ΔM [g/g]	ΔT [$^\circ\text{C}$]	ΔM [g/g]
$y = -3,0225$	0,19	0,02760	0,11	0,02128	0,01	0,00098
$y = -1,51125$	0,19	0,02659	0,11	0,02135	0,01	0,00103
$y = 0$	0,18	0,02036	0,10	0,01186	0,01	0,00049
$y = 1,51125$	0,17	0,02300	0,10	0,01064	0,01	0,00023
$y = 3,0225$	0,16	0,02858	0,09	0,02054	0,01	0,00067

Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.16: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ, ($y = -1,51125$ cm) para a secagem a 60°C .

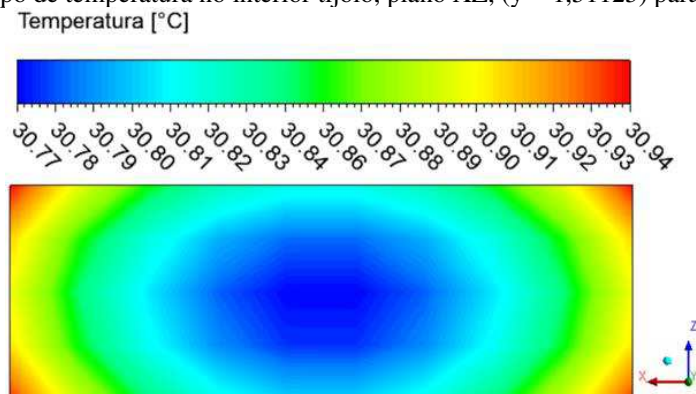


Fonte: acervo do autor, 2023.

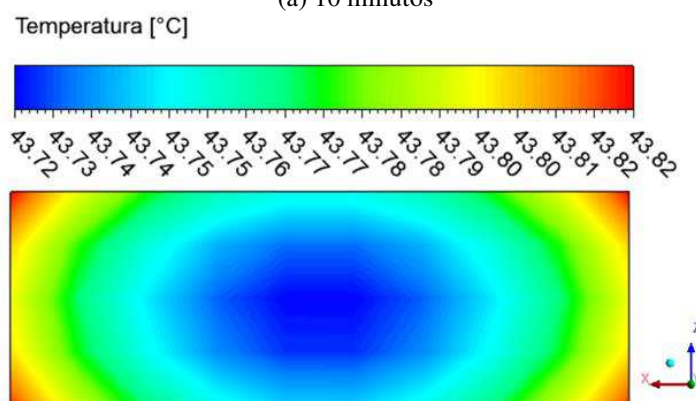
Figura 4.17: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ, ($y = 0$ cm) para a secagem a 60°C .

Fonte: acervo do autor, 2023.

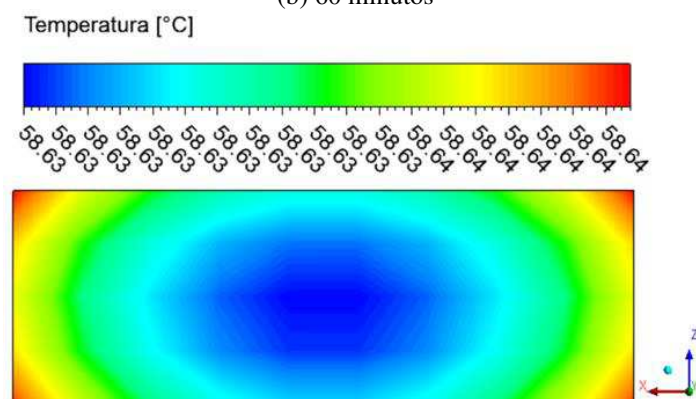
Figura 4.18: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ, ($y = 1,51125$) para a secagem a 60°C



(a) 10 minutos



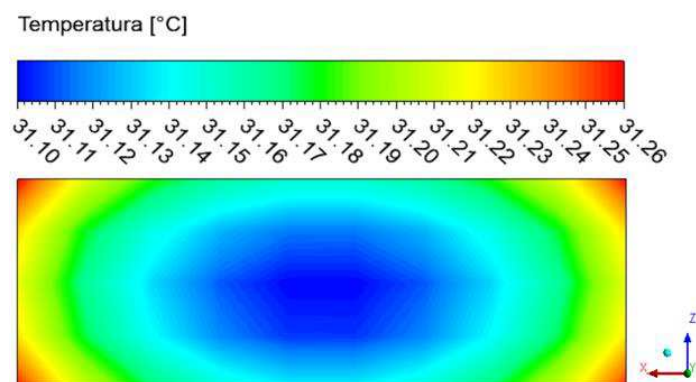
(b) 60 minutos



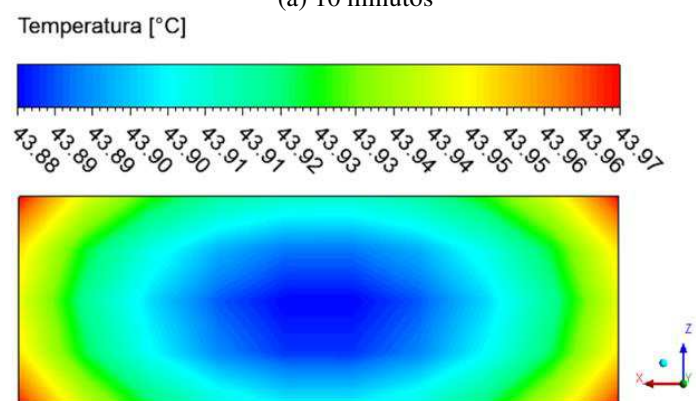
(c) 270 minutos

. Fonte: acervo do autor, 2023.

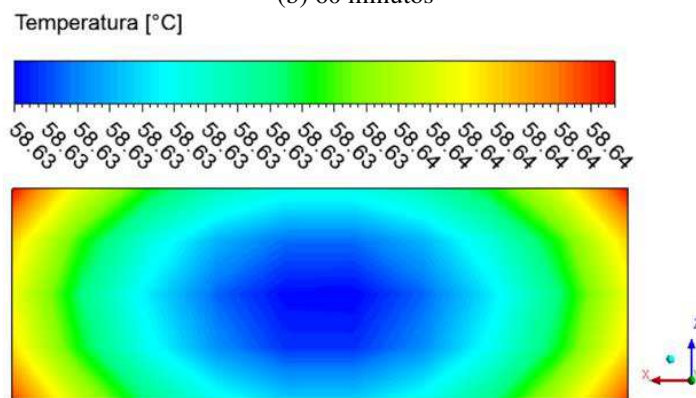
Figura 4.19: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ, ($y = 3,0225$ cm) para a secagem a 60°C .



(a) 10 minutos



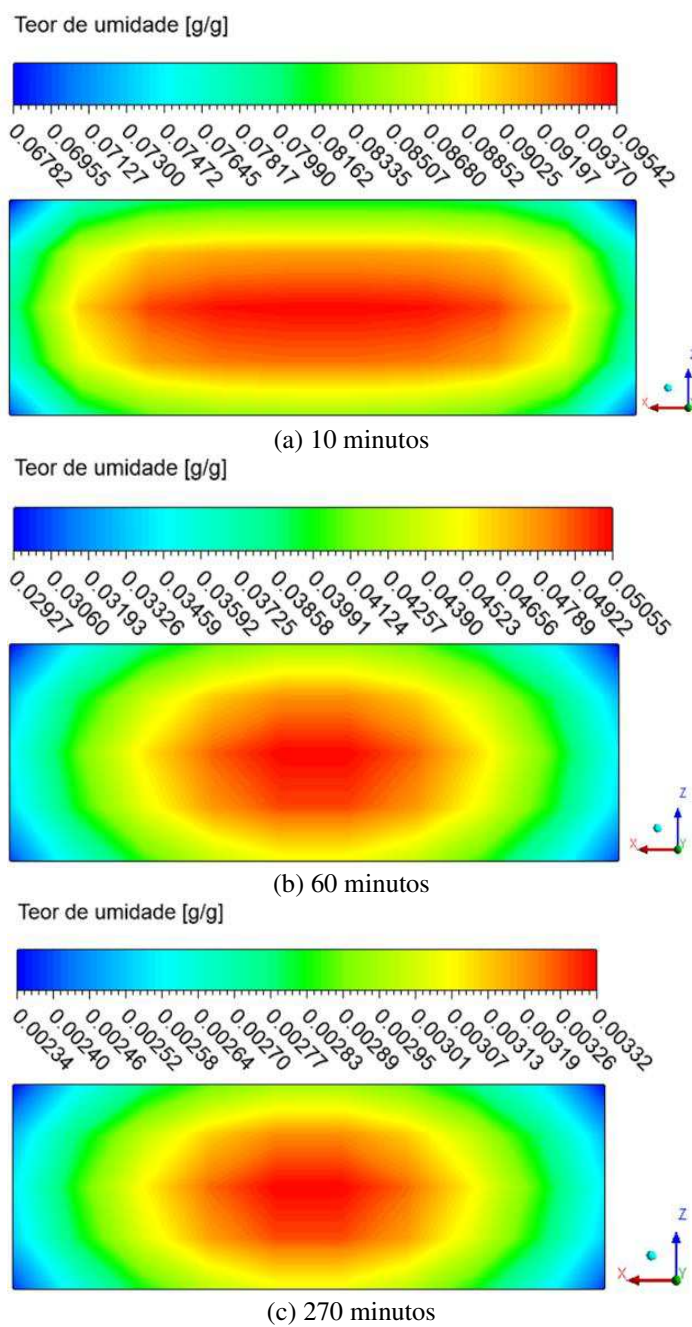
(b) 60 minutos



(c) 270 minutos

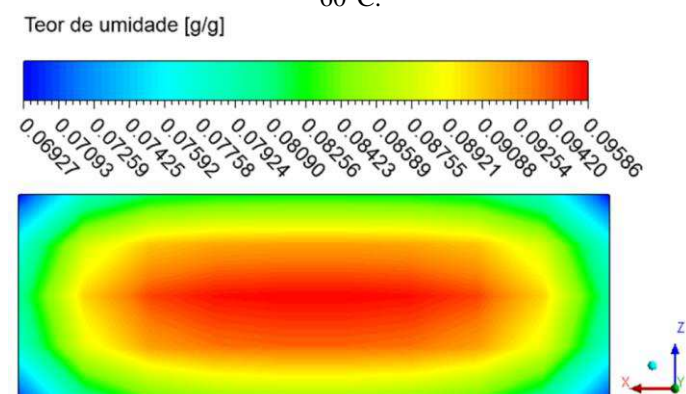
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.20: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = 0$ cm), para a secagem a 60°C .

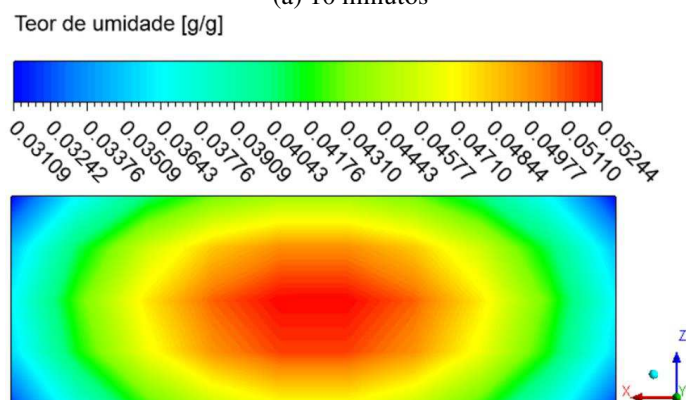


Fonte: acervo do autor, 2023.

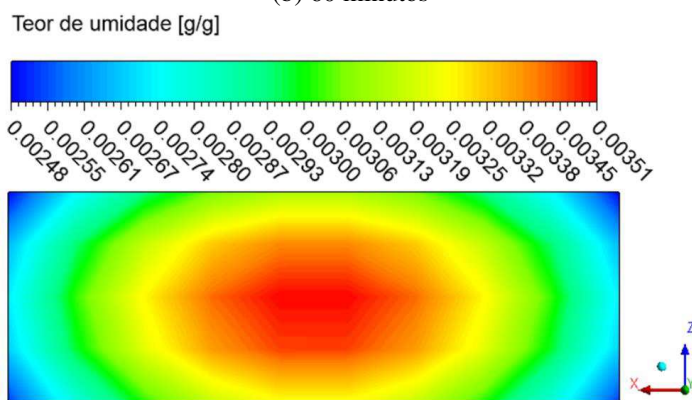
Figura 4.21: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = 1,51125$ cm), para a secagem a 60°C .



(a) 10 minutos



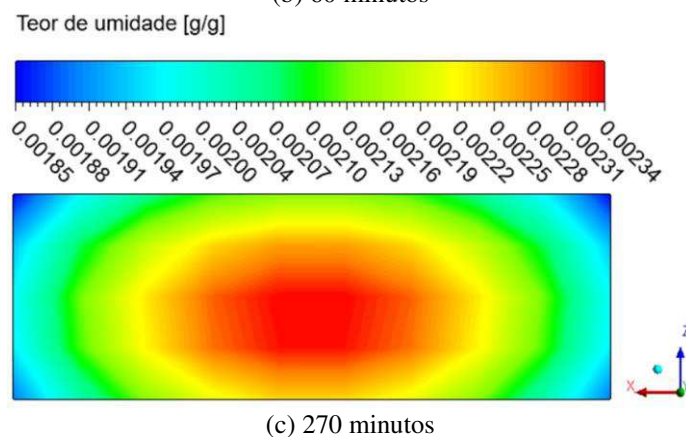
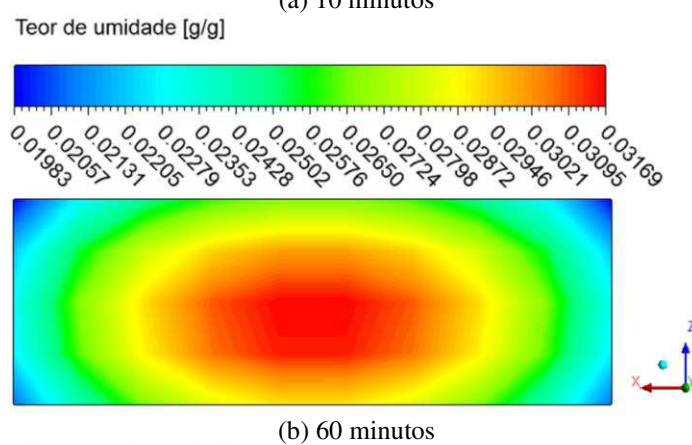
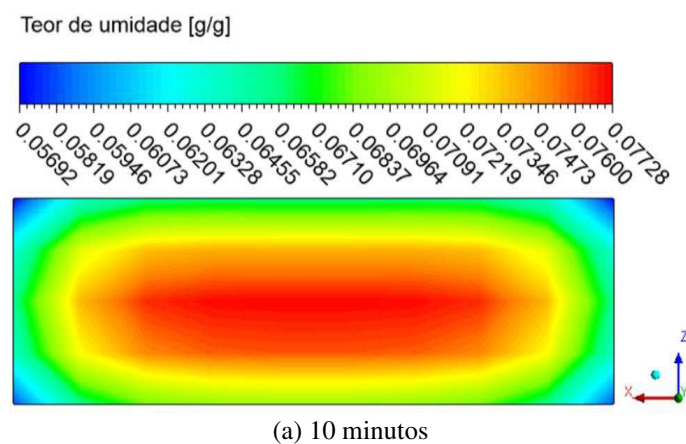
(b) 60 minutos



(c) 270 minutos

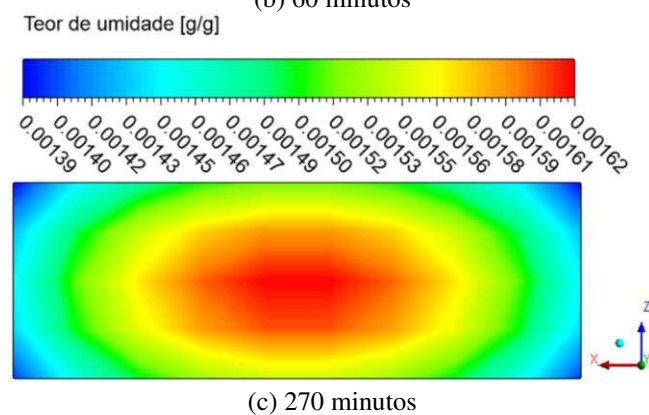
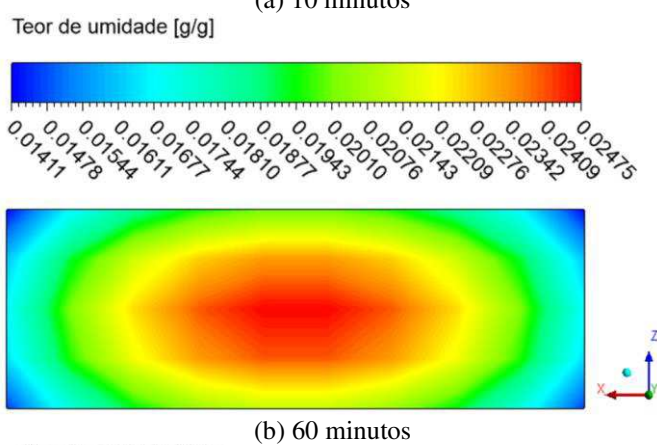
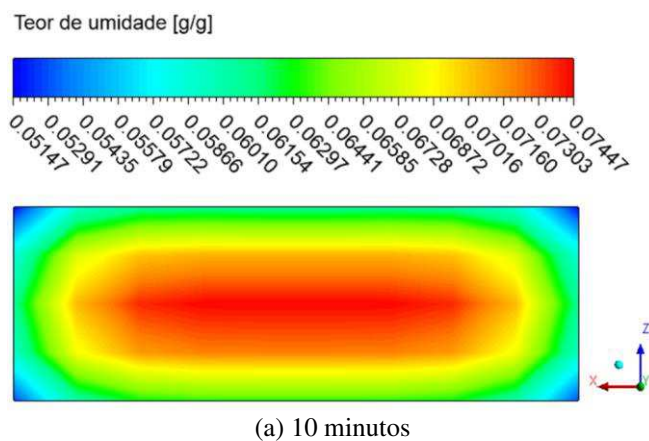
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.22: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = 3,0225$ cm) para a secagem a 60°C .



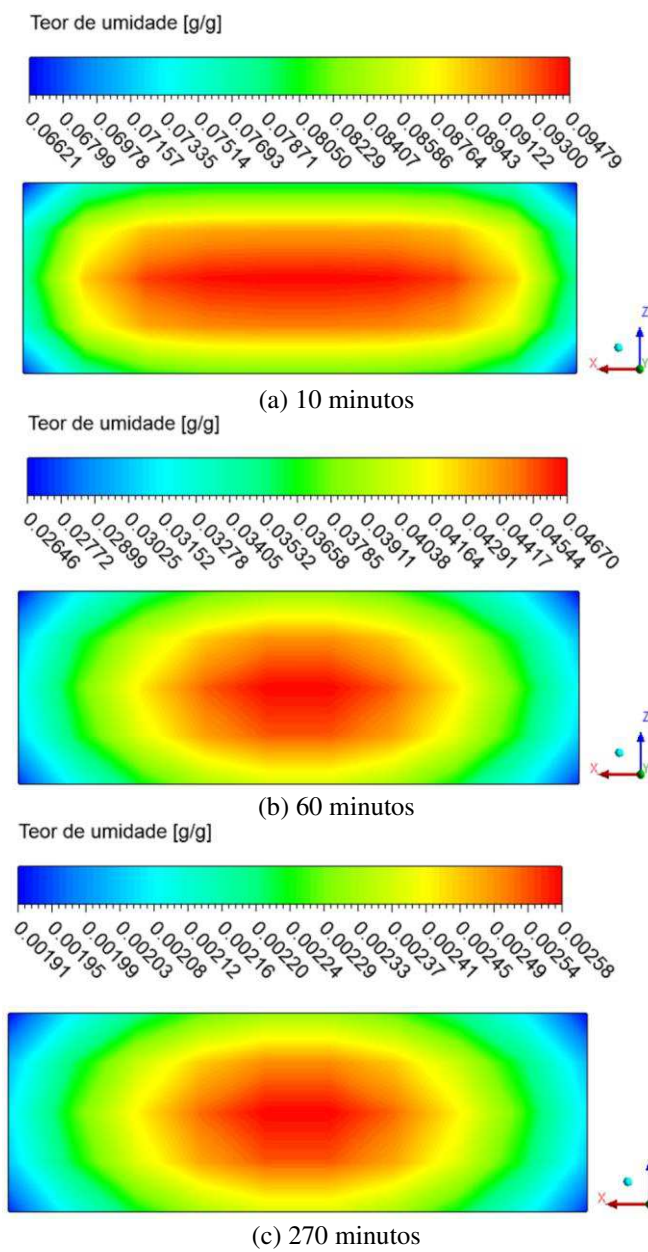
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.23: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = -3,0225$ cm) para a secagem a 60°C .



Fonte: acervo do autor, 2023.

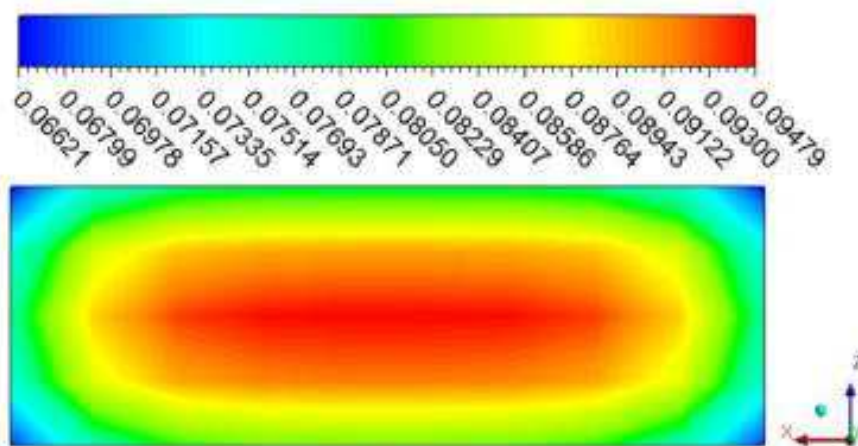
Figura 4.24: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = -1,51125$ cm) para a secagem a 60°C .



Fonte: acervo do autor, 2023.

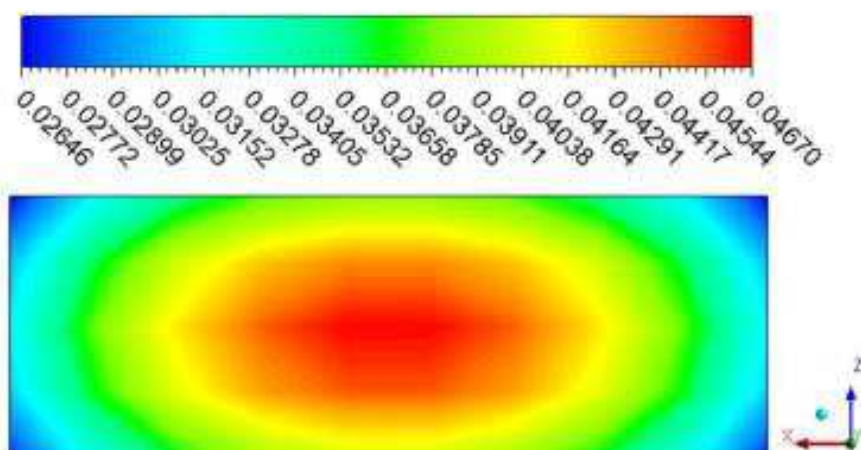
Figura 4.30 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ, ($y = -1,51125$ cm) para a secagem a 60°C .

Teor de umidade [g/g]



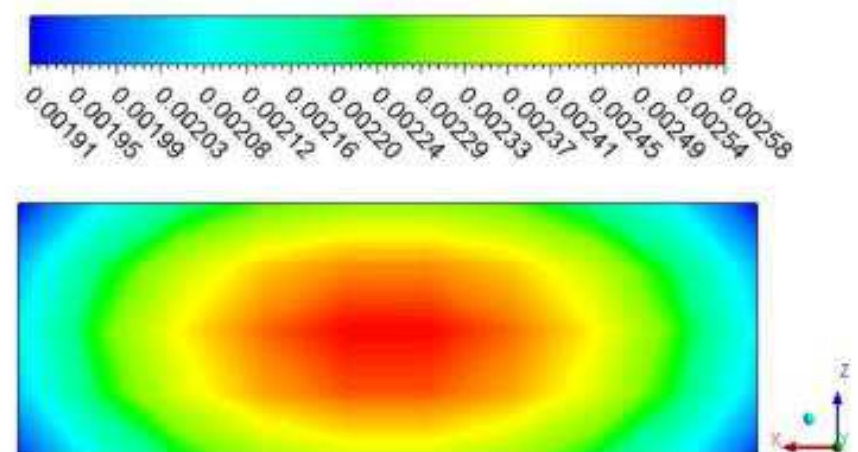
(a) 10 minutos

Teor de umidade [g/g]



(b) 60 minutos

Teor de umidade [g/g]



(c) 270 minutos

Fonte: acervo do autor, 2023.

4.3.1.2 Análise para os Planos XY

Nas imagens a seguir (Fig. 4.30; Fig. 4.31; Fig. 4.32) vê-se que tal como nos planos XZ, o transporte calorífico da camada superficial do bloco para dentro no material, mediante uma análise do comportamento térmico. Enquanto, por meio das figuras de umidade (Fig. 4.33; Fig. 4.34; Fig. 4.35), vê-se que o transporte mássico se efetua mais intensamente próximo as superfícies, sendo possível a visualização dos diferenciais mássicos nos planos observados.

Vê-se um leve diferencial térmico e mássico, reduzindo assim, as sequelas de uma secagem não uniforme e por consequência dos riscos de se produzir fissuras e deformações no material, tanto na secagem quanto durante a queimagem.

Mediante uma análise nas Fig. 4.30, Fig. 4.31 e Fig. 4.32, vê-se que a camada superficial do bloco cerâmico que se encontra na parte superior (plano XY em $z=0,706$ cm) possui um comportamento térmico levemente mais elevado que o meio do bloco. Sendo o inverso deste comportamento também percebido para a concentração mássica que são maiores próximos ao meio e menores próximos as camadas laterais.

Os planos XY, tanto para temperatura quanto para umidade, apresentam os maiores valores deslocados para a direita das figuras. Isso ocorre devido a assimetria do comportamento térmico provocado pelo sentido da fase gasosa que ocorre da esquerda para a direita nesses planos. O aquecimento assimétrico evidencia que a localização do bloco no interior do secador e o sentido da fase gasosa afetam diretamente as distribuições térmicas e mássicas.

Em todo curso da secagem a 60°C , vê-se que a parte de dentro do bloco mantém-se com temperaturas menores que as constatadas em suas camadas superficiais, entretanto com a umidade maior que as constatadas nas extremidades do tijolo Fig. 4.33; Fig. 4.34; Fig. 4.35. Embora se constate uma evidente tendência de comportamento ao longo dos planos analisados que se repetem para a temperatura e umidade, os diferenciais térmicos e mássicos possuem valores que não são grandes o suficiente para proporcionar riscos de trincas, deformações e fissuras.

Comparando-se os planos XY desde a superfície superior ($z = 0,706$ cm) ao meio do bloco ($y = 0,353$ cm), vê-se que a medida que o tempo passa o diferencial térmico nos planos diminuem. O seu maior valor consiste em $\Delta T = 1,00^{\circ}\text{C}$, e se estabiliza no tempo final em $\Delta T = 0,06^{\circ}\text{C}$ para os três planos.

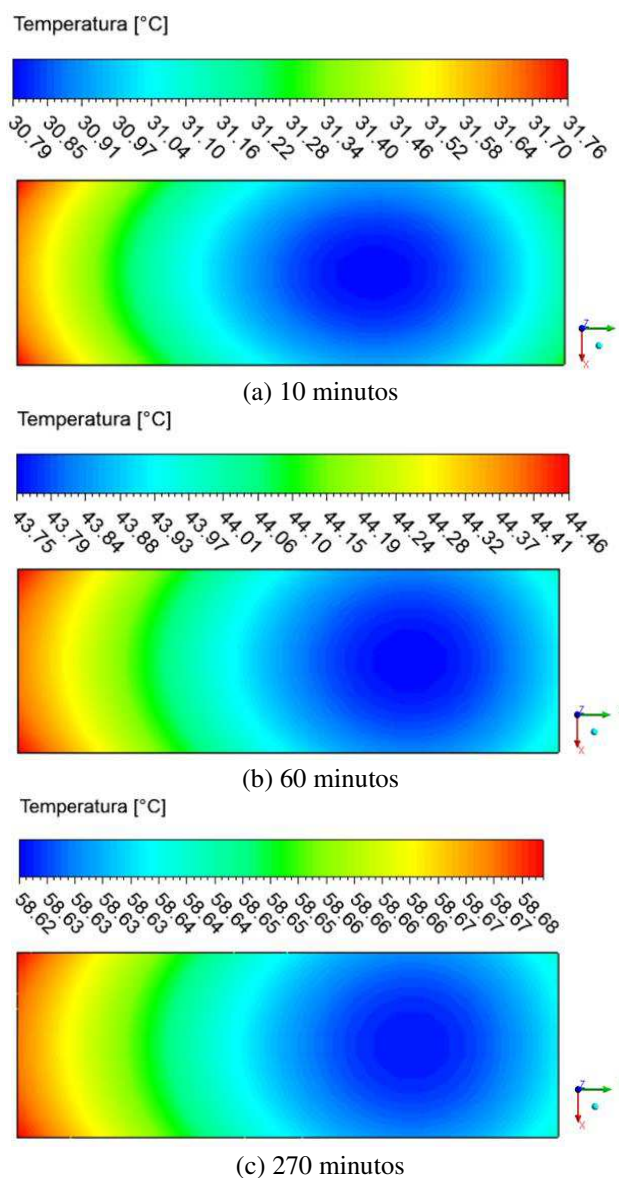
Se compararmos o diferencial mássico nos planos XY desde a superfície superior ($z = 0,706$ cm) até o meio do bloco ($y = 0,353$ cm), vê-se ele tende a ser maior no plano situado no meio do bloco ($y = 0,353$ cm), alcançando um máximo de $\Delta M = 0,03564$, em 60 min.

Tabela 4.4: Gradientes máximos de temperatura teor de umidade nos planos XZ.

Posição do Plano XY [cm]	Tempo de Secagem a 60°C					
	10 min		60 min		270 min	
	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]
Z = 0,706	1,00	0,03492	0,71	0,03296	0,06	0,00187
Z = 0,5295	0,96	0,03393	0,70	0,03400	0,06	0,00200
Z = 0,353	0,97	0,03496	0,71	0,03564	0,06	0,00211

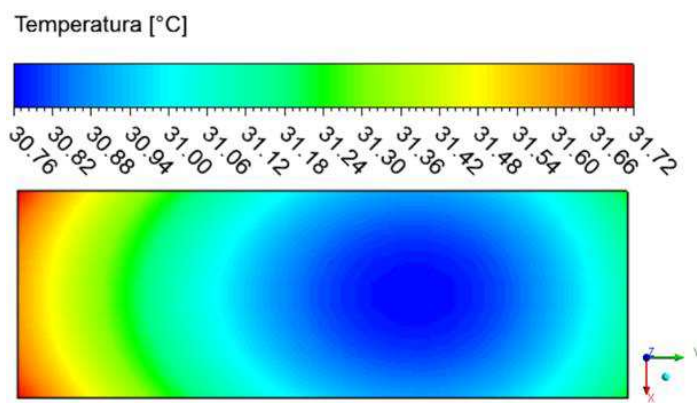
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.25: Campo de temperatura no interior tijolo, plano YX ($z = 0,706$ cm), para a secagem a 60°C.

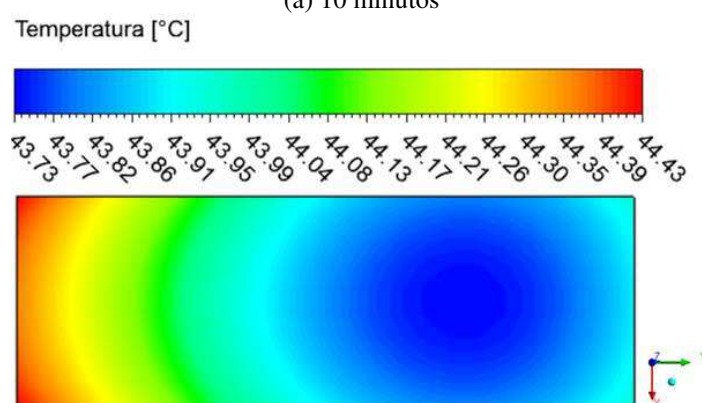


Fonte: acervo do autor, 2023.

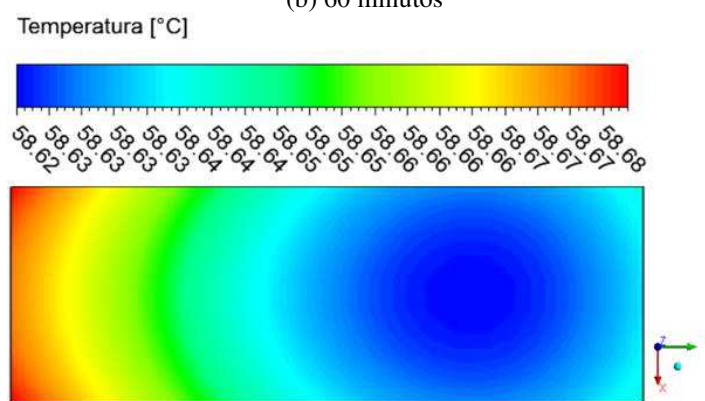
Figura 4.26: Campo de temperatura no interior tijolo, plano YX ($z = 0,5295$ cm), para a secagem a 60°C .



(a) 10 minutos



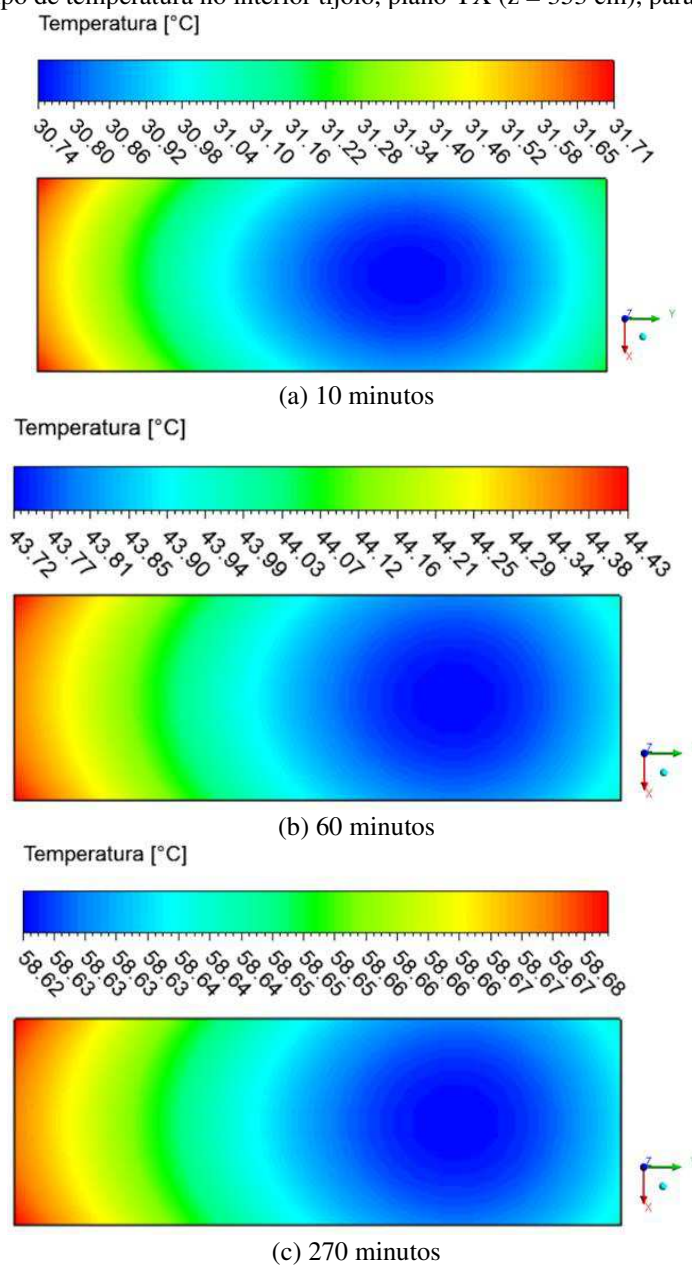
(b) 60 minutos



(c) 270 minutos

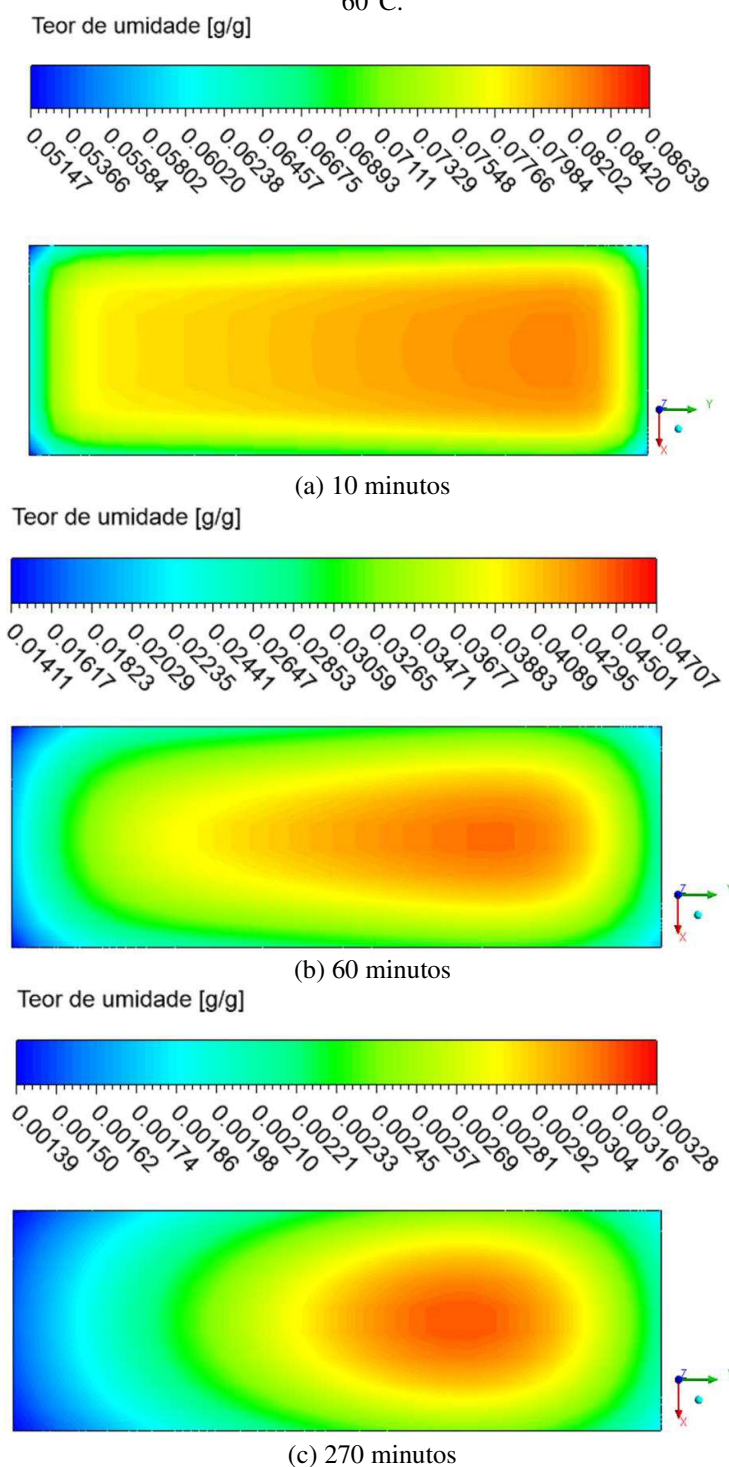
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.27: Campo de temperatura no interior tijolo, plano YX ($z = 353$ cm), para a secagem a 60°C .



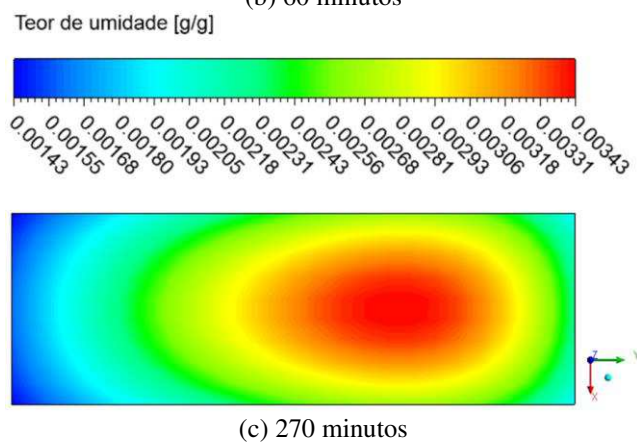
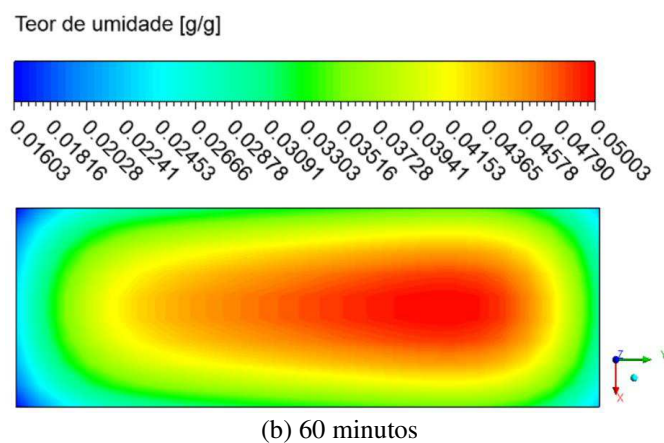
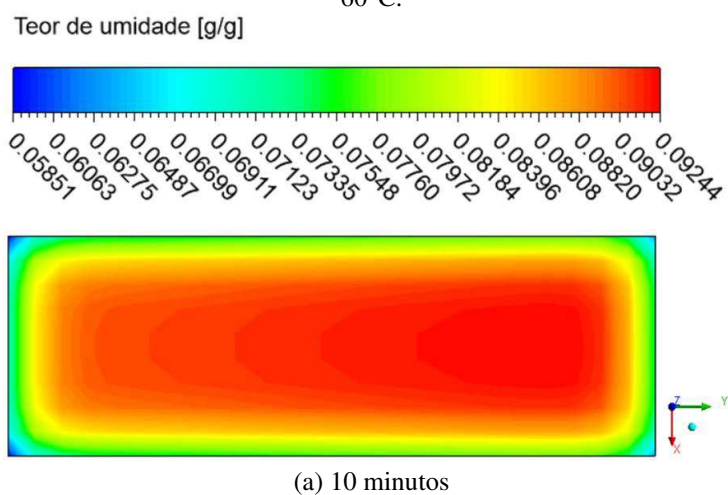
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.28: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 706$ cm), para a secagem a 60°C .



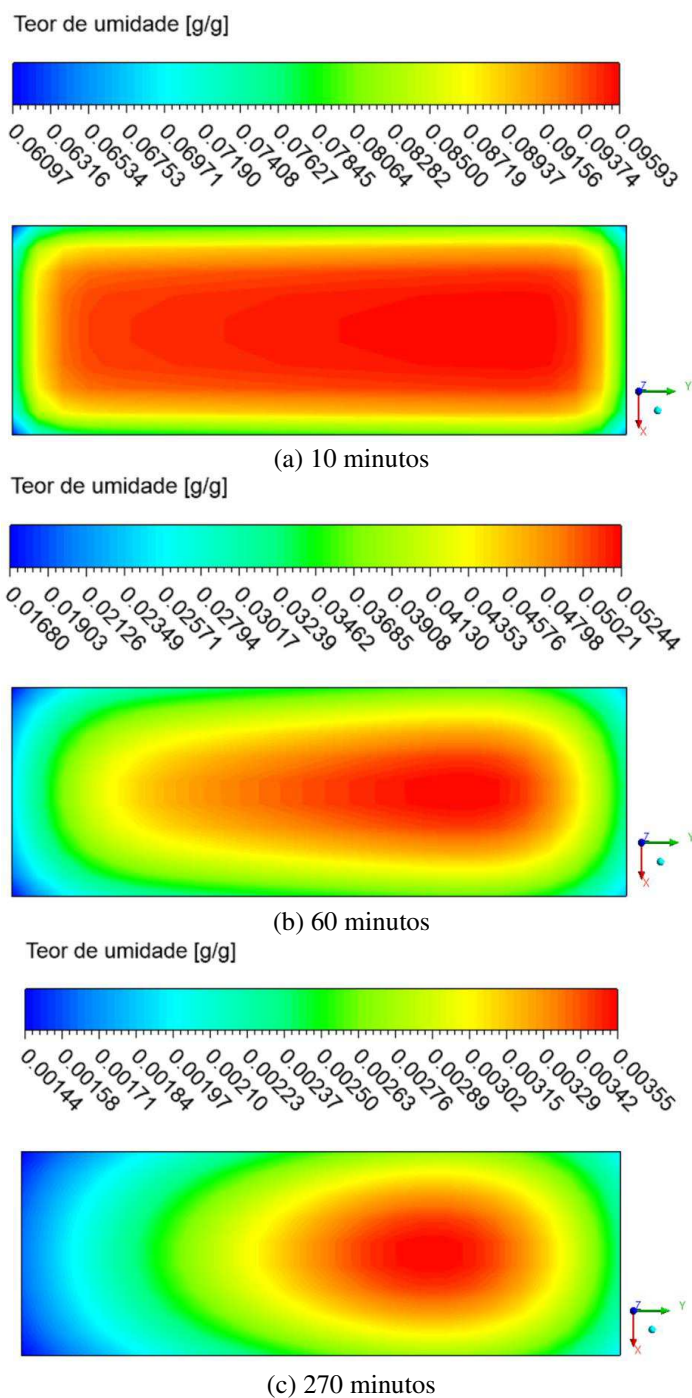
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.29: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,5295$ cm), para a secagem a 60°C .



Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.30: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,353$ cm), para a secagem a 60°C .



Fonte: acervo do autor, 2023.

4.2.3.1 Análise para os Planos YZ

Nas imagens a seguir (Fig. 4.36; Fig. 4.37; Fig. 4.38) foi possível observar, por meio do diferencial térmico que, assim como nos planos XZ e XY, o transporte calorífico ocorre das camadas superficiais para dentro do material. Enquanto, por meio das figuras de umidade (Fig. 4.39; Fig. 4.40; Fig. 4.41), vê-se que o transporte mássico acontece mais intensamente próximo as superfícies, pois são os locais com menores valores de concentração aquosa.

Os valores máximos do diferencial térmico e mássico são de modo respectivo, $\Delta T=0,9$ e $\Delta M= 0,03496$, que consistem em variações menores que as produzidas pelas secagens a 80 e 110°C, reduzindo assim, as sequelas de uma desidratação não uniforme e por consequência dos riscos de se produzir fissuras e deformações no bloco, tanto no curso da secagem quanto durante a queimagem.

Mediante uma análise nas imagens Fig 4.36, Fig. 4.37 e Fig. 4.38, vê-se que a camada superficial do bloco que se encontra na lateral do bloco (plano YZ, em $x = 1,0207$ cm) possui um comportamento térmico levemente mais elevado que o dos outros dois planos ZY ($x = 0,5135$ cm; $x = 0$ cm) que se aproximam do meio do bloco, somente para os tempos de 10 e 60 min. Para o tempo de 270 min, o comportamento térmico torna-se exatamente igual para os três planos, apresentando o mesmo diferencial térmico de $\Delta T=0,06^\circ\text{C}$.

Os planos ZY, tanto para temperatura quanto para umidade, apresentam os maiores valores deslocados para a direita das figuras. Isso se efetua devido à assimetria do fornecimento calorífico provocado pelo sentido da fase gasosa que ocorre da esquerda para a direita nesses planos.

No que concerne à umidade, vê-se que nos tempos analisados para a temperatura de 60°C, a concentração mássica aquosa é maior nos planos que se aproximam do meio do bloco, e menor no locais que se aproximam das camadas superficiais (Fig. 4.39, Fig. 4.40 e Fig. 4.41).

Comparando-se os planos YZ desde a superfície superior ($z = 0,706$ cm) até o plano situado no meio do bloco ($y = 0,353$ cm), vê-se que à medida que o tempo passa o o diferencial térmico nos planos diminuem. O seu menor valor é o mesmo para os três planos, acontecendo no final do curso de secagem: $\Delta T = 0,06^\circ\text{C}$.

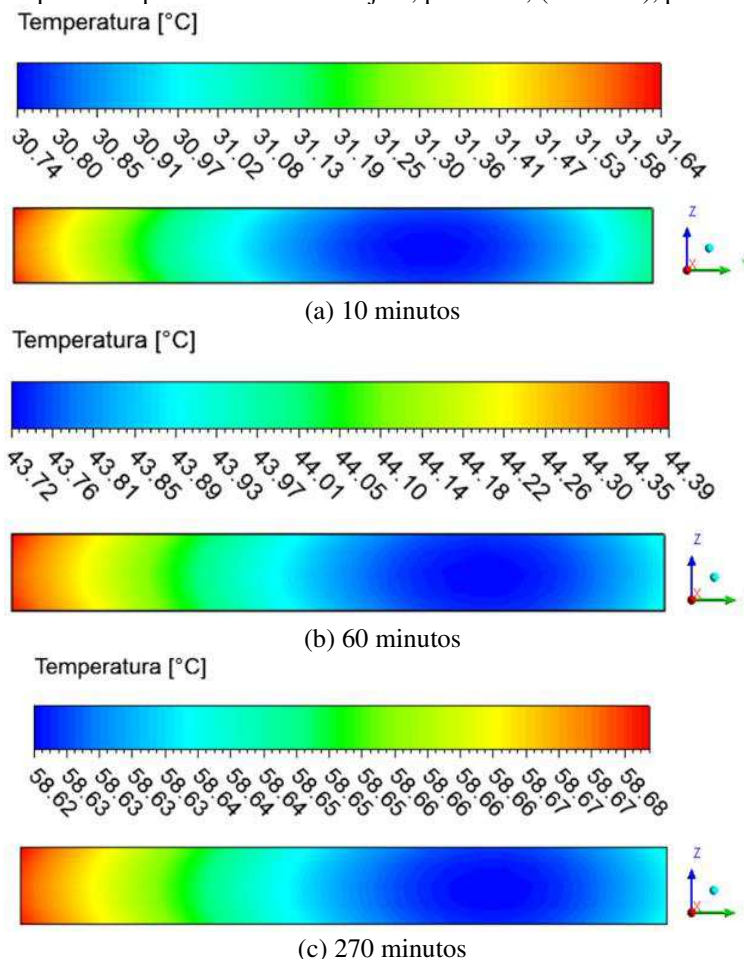
No que concerne ao diferencial mássico dos planos ZY desde a superfície lateral ($x = 1,027$ cm) até o plano situado no meio do bloco ($x = 0$ cm), vê-se que ele tende a ser maior no plano situado no meio do bloco ($x = 0$ cm), alcançando $\Delta M=0,03496$, em 10 min.

Tabela 4.5: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos ZY.

Posição do Plano ZY [cm]	Tempo de Secagem a 60°C					
	10 min		60 min		270 min	
	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]
X = 0,00	0,90	0,03496	0,67	0,03238	0,06	0,00203
X = 0,5135	0,90	0,03390	0,66	0,02968	0,06	0,00185
X = 1,0270	0,89	0,02863	0,66	0,02217	0,06	0,00135

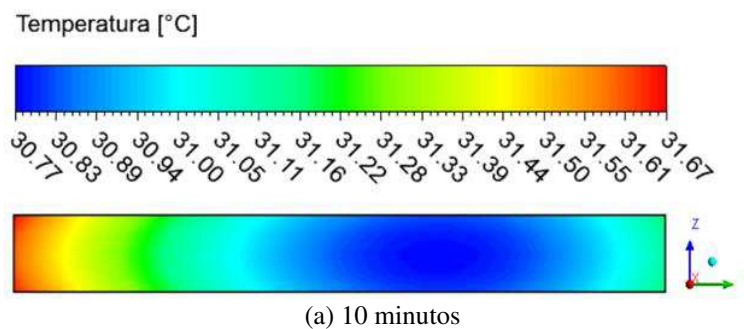
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.31: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY, ($x = 0$ cm), para a secagem a 60°C.



Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.32: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY, ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 60°C.



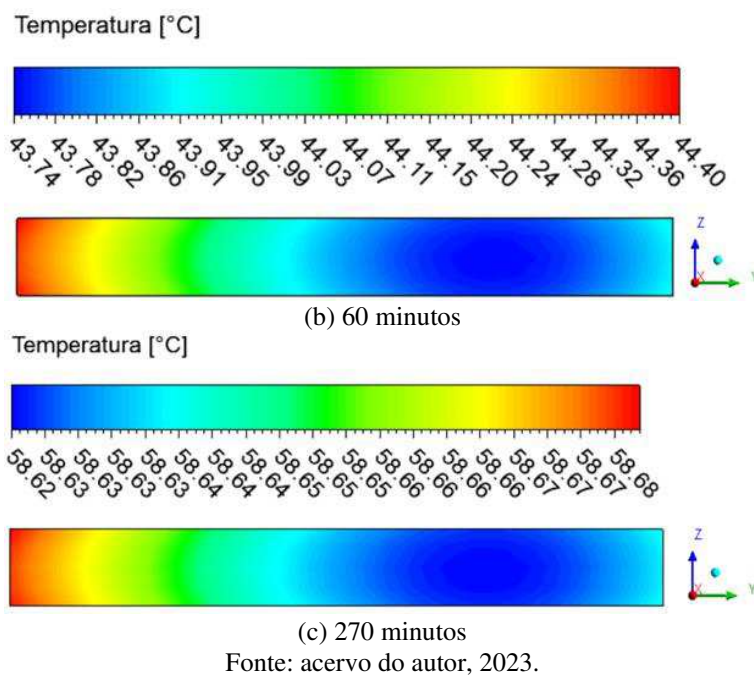


Figura 4.33: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY, ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 60°C .

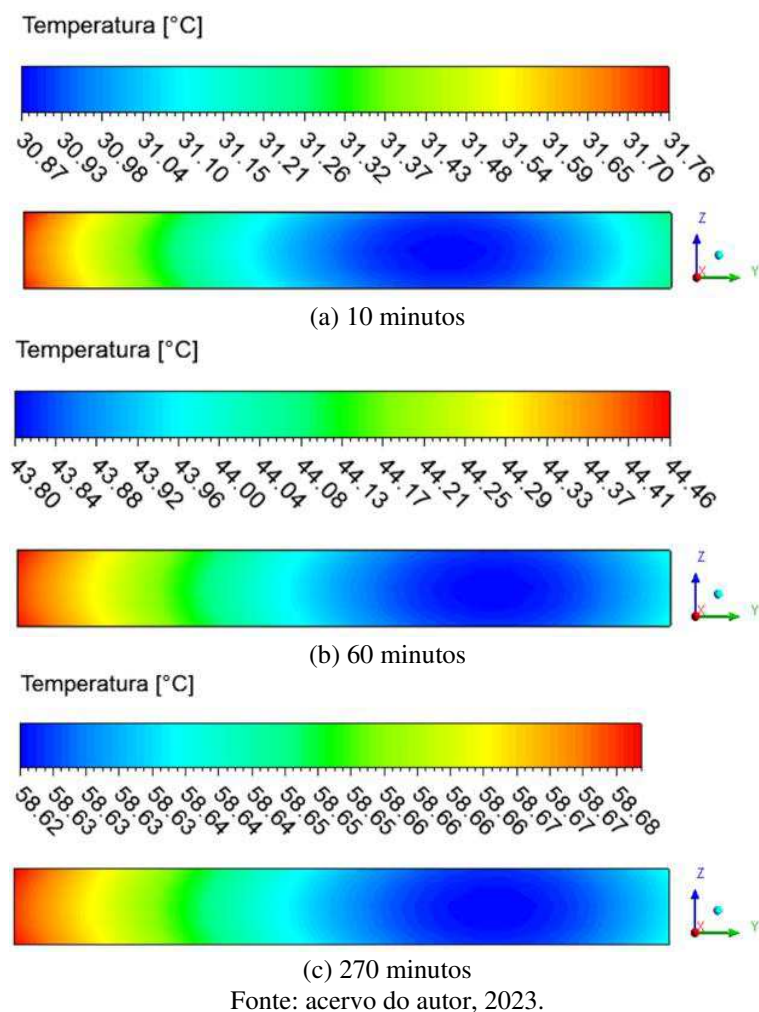
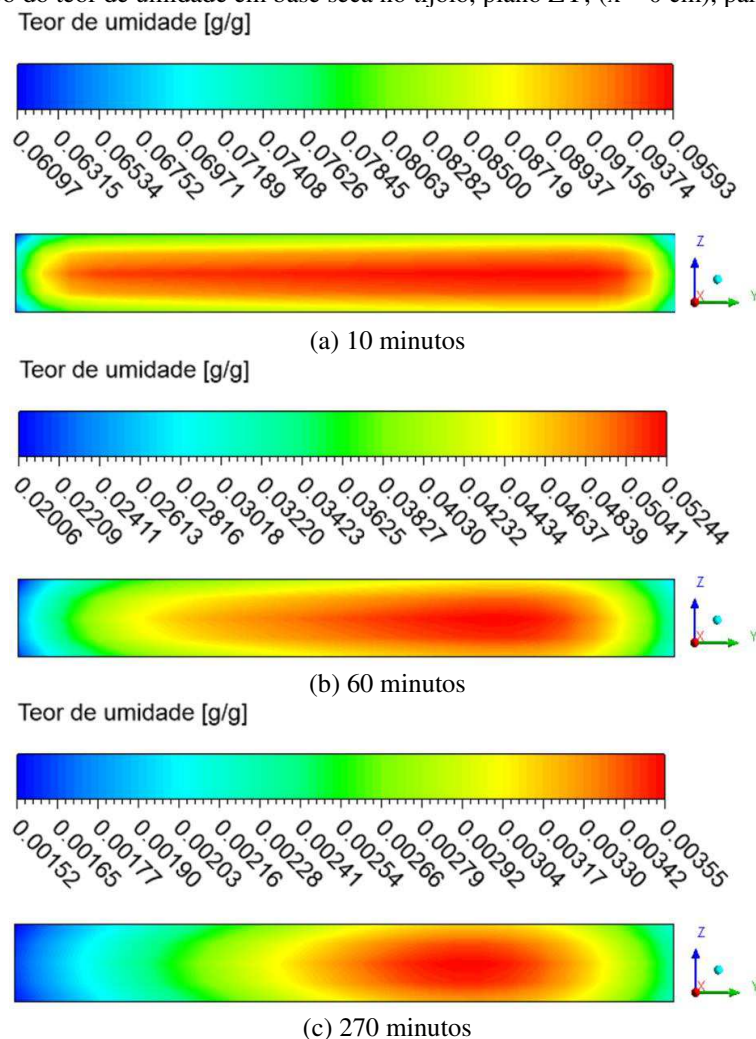
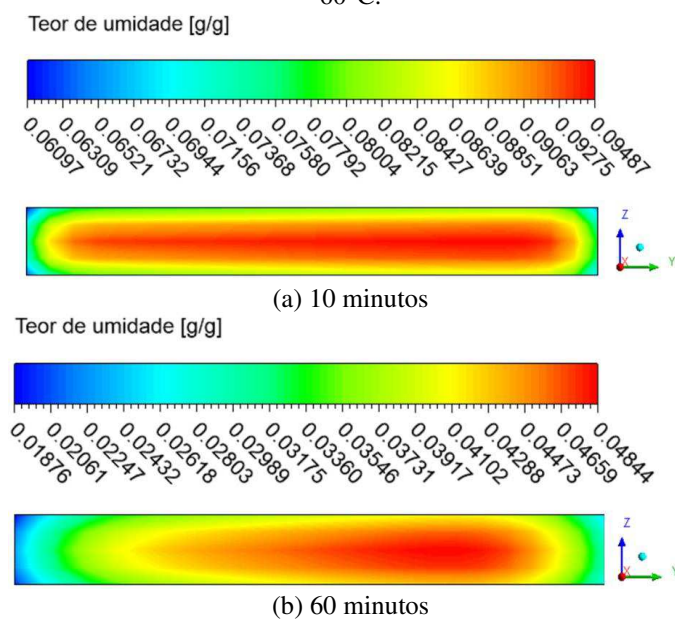


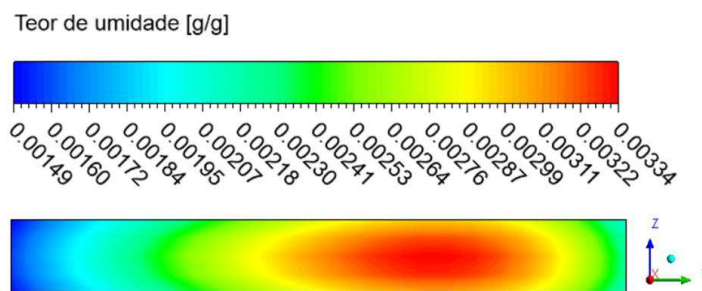
Figura 4.40: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY, ($x = 0$ cm), para a secagem a 60°C .



Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.34: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY, ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 60°C .

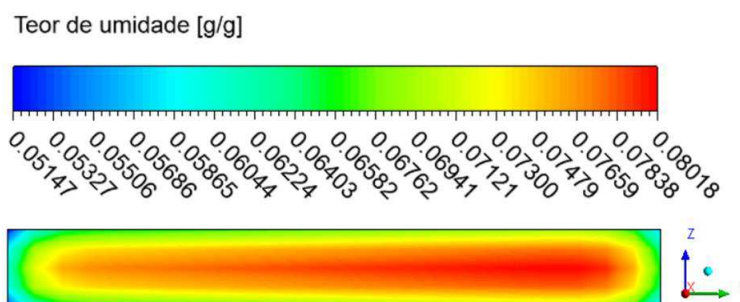




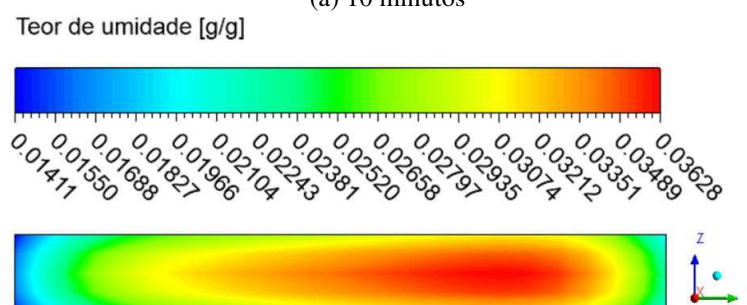
(c) 270 minutos

Fonte: acervo do autor, 2023.

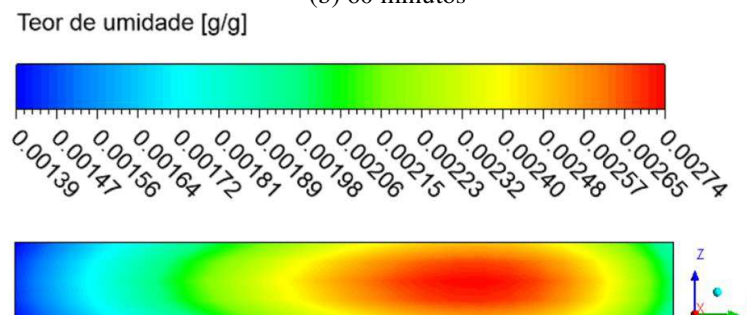
Figura 4.35: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY, ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 60°C .



(a) 10 minutos



(b) 60 minutos



(c) 270 minutos

Fonte: acervo do autor, 2023.

4.4 Caso 2 (Argila Vermelha, T=80°C)

4.4.1 Evolução Cinética de Secagem e Aquecimento do bloco cerâmico

A Fig. 4.42 ilustra a comparação os valores preditos, mediante de modelagem matemática com e os valores empíricos de Nascimento (2001) da concentração aquosa média médio no decorrer da secagem de blocos cerâmicos em T=80°C.

Ao analisar-se a evolução cinética de secagem mediante a Fig. 4.42, vê-se que os resultados numérico e experimental estão bem ajustados nos tempos inicial e final da simulação, apesar de em torno dos 50 minutos essas curvas apresentarem uma leve dissociação. Fato este, que não ocorreu para a secagem na temperatura de 60°C e 110°C.

Uma análise quantitativa dos dados presentes na Fig. 4.42 foi realizada mediante avaliação estatística a partir dos erros médios e relativos, incluindo variância dos quadrados dos resíduos e correlação de Pearson (Tab. 4.7). Dessa forma, pode-se perceber que essa avaliação estatística tende a confirmar o bom ajuste dos resultados desse trabalho com os de Nascimento (2002), validando o modelo matemático em questão para T=80°C e umidade relativa 5%.

No ajuste achou-se uma difusividade mássica de $0,8 \times 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$, um resultado de 5,58% menor que o valor reportado por Nascimento (2002) e um erro médio quadrático de 0,00628346 2 kg/kg.

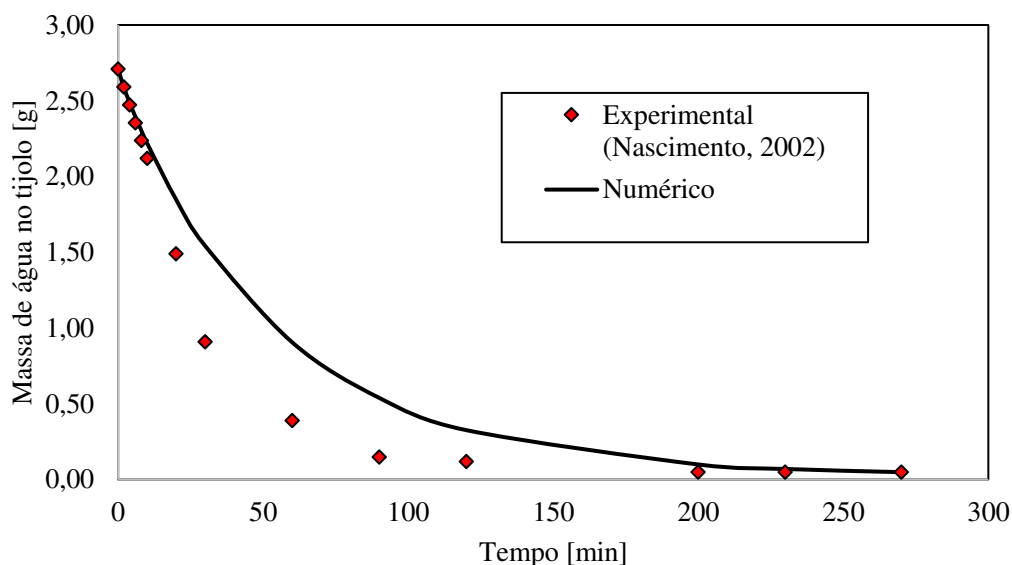
Tabela 4.6: Parâmetros da análise quantitativa para secagem a 80°C.

Temperatura de Secagem a 80°C			
E_m	$ERMQ$	δV	r_p
52,82	0,94	0,072	0,983

Fonte: acervo do autor, 2023.

A Figura 4.43 ilustra a variação do teor de umidade adimensional e a temperatura média adimensional do bloco no decurso da operação, ambas as variáveis obtidas por meio de modelagem matemática.

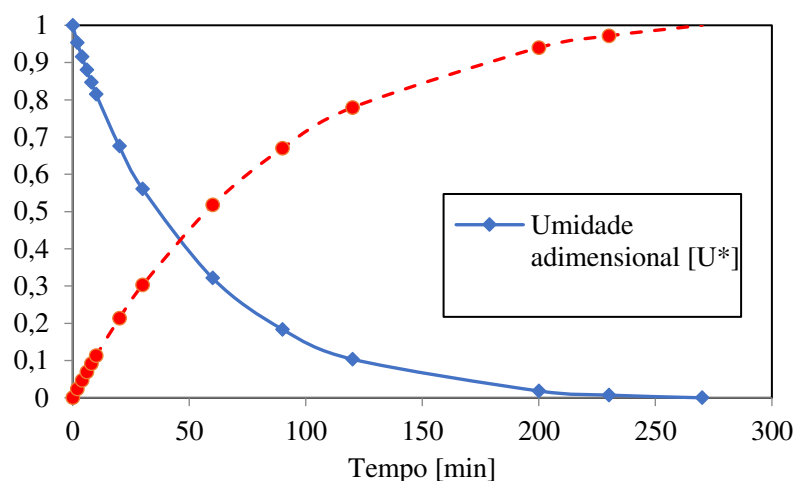
Figura 4.36: Comparação entre o resultado teórico e experimental da massa aquosa no interior do secador (Caso 2).



Fonte: acervo do autor, 2023.

Há uma concordância lógica de simetria entre ambas as curvas, dado que à medida que há fornecimento de calorífico e aumenta sua temperatura, o mesmo perde massa aquosa diminuindo sua umidade. Em aproximadamente 270 min, o material atinge seu equilíbrio térmico e mássico.

Figura 4.37: Predição do teor de umidade médio e temperatura média do bloco cerâmico no decurso do tempo total (Caso 2).



Fonte: Acervo do autor, 2023.

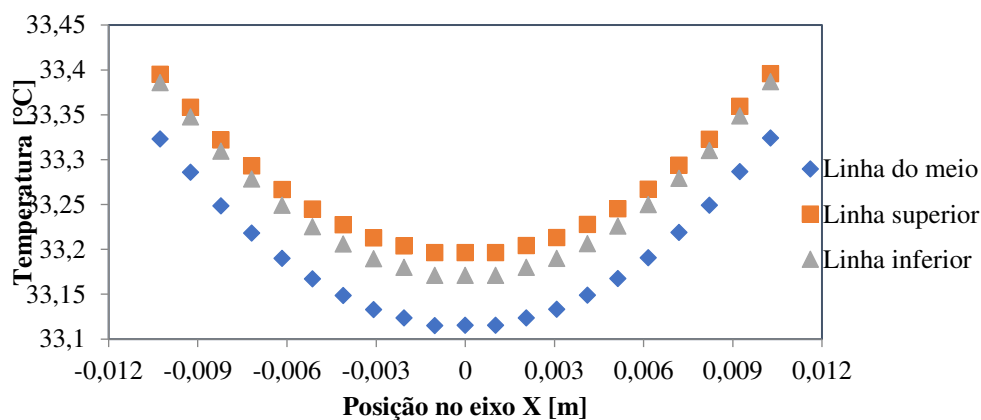
4.4.1 Perfil linear de evolução térmica no bloco cerâmico

O comportamento linear térmico tratado na Fig. 4.3, para a desumidificação a 80°C, é visto nas 3 figuras a seguir, em 10, 60 e 270 min. Mediante os gráficos, vê-se que no decurso do eixo X existe uma tendência à simetria, onde a temperatura é maior nas extremidades deste

eixo, ou seja, nas duas superfícies laterais do bloco cerâmico, e menor na posição $x = 0$ cm, ou seja dentro do bloco. Em 270 min, o comportamento térmico das três linhas tende a se linearizarem próximo à $T=77,5^{\circ}\text{C}$.

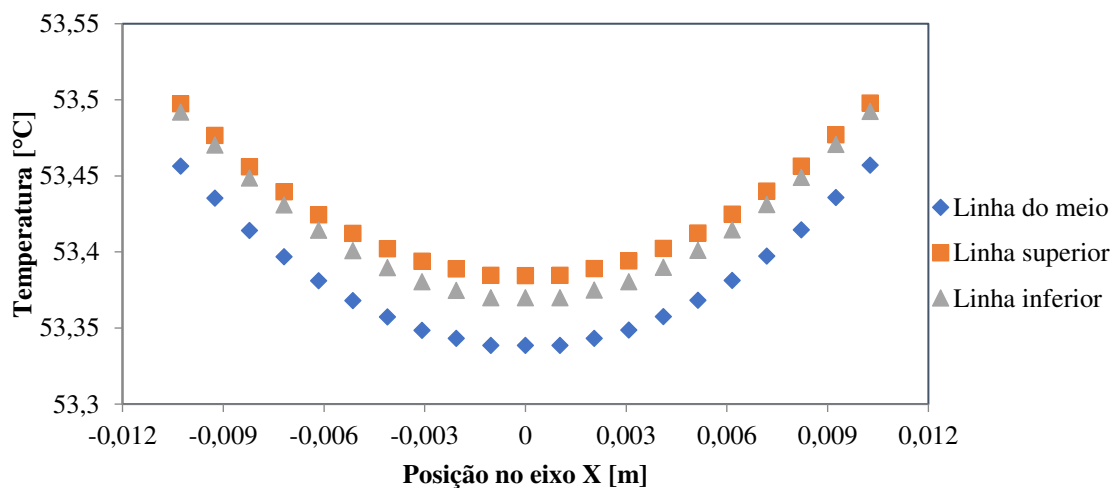
Assim como para a 60°C (Caso 1), as curvas possuem a forma de uma parábola com concavidade voltada para cima, ou seja, os pontos localizados nas extremidades das linhas (faces do tijolo), atingem mais rapidamente o equilíbrio térmico que dentro do bloco.

Figura 4.38: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=10$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$.



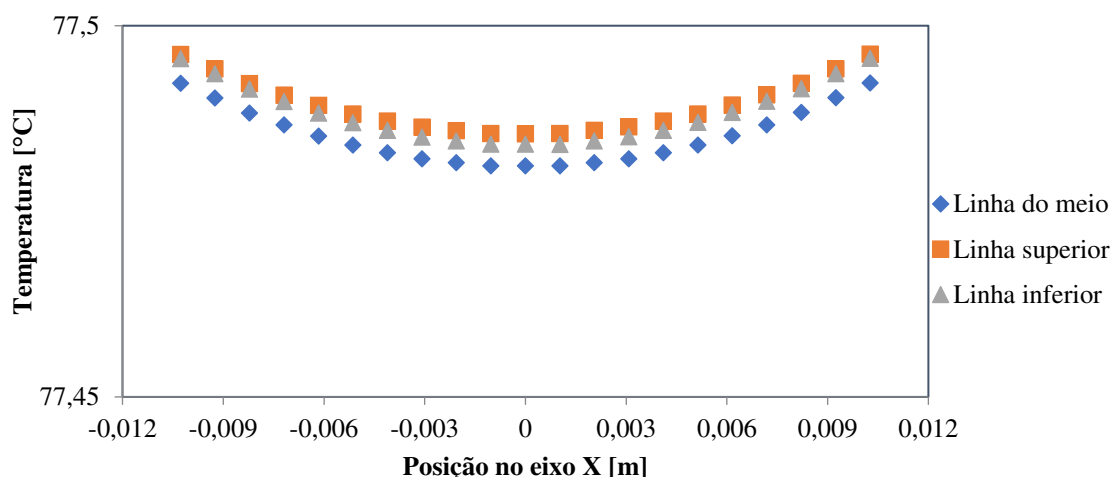
Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.39: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=60$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

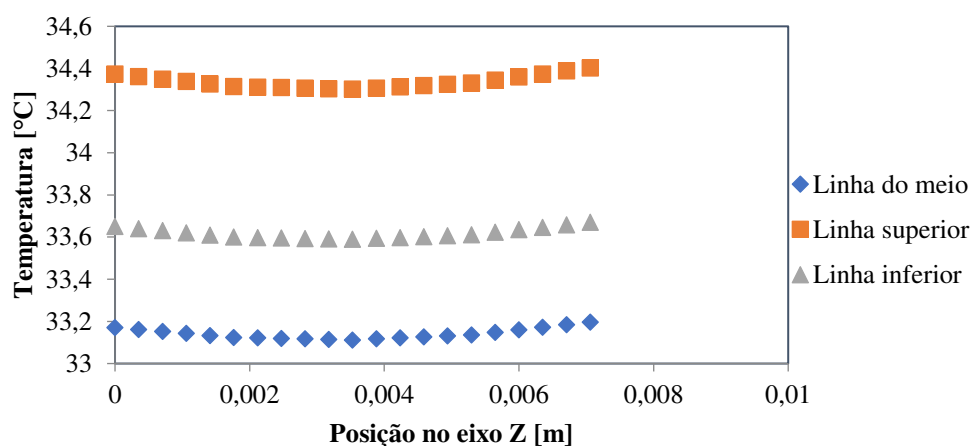
Figura 4.40: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=270$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

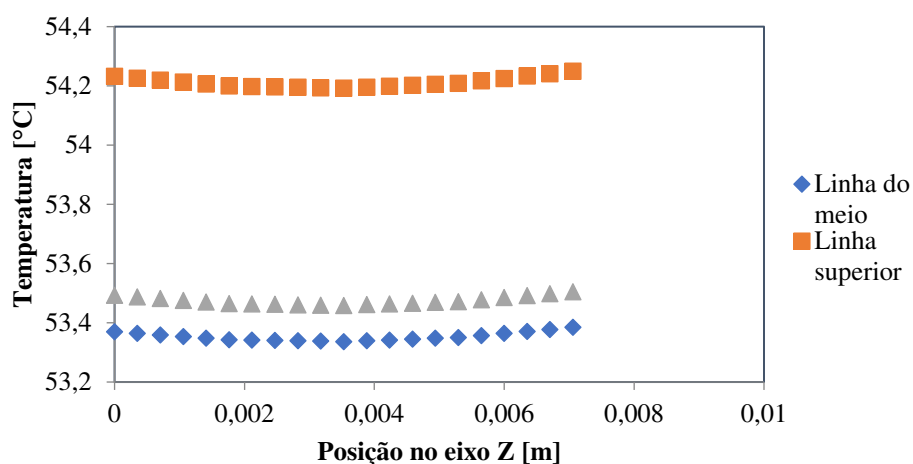
O comportamento térmico linear assistido na Fig. 4.2, para a desumidificação a 80°C , retratadas nas 3 imagens a seguir, em 10, 60 e 270 min. Mediante os gráficos, vê-se que os gradientes térmicos na extensão mesma linha se aproximam de zero, motivo provavelmente justificado mediante a posição da linha que se encontra perpendicular ao ao sentido da fase gasosa, ou seja, o transporte de calor é simultâneo em todos os locais ao longo destas linhas. A linha situada na camada superficial do bloco que se encontra no plano XZ em $y = -3,14551$ se mantém com temperatura mais elevada que as outras por conta do constante contato com a fase gasosa.

Figura 4.41: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=10$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$.



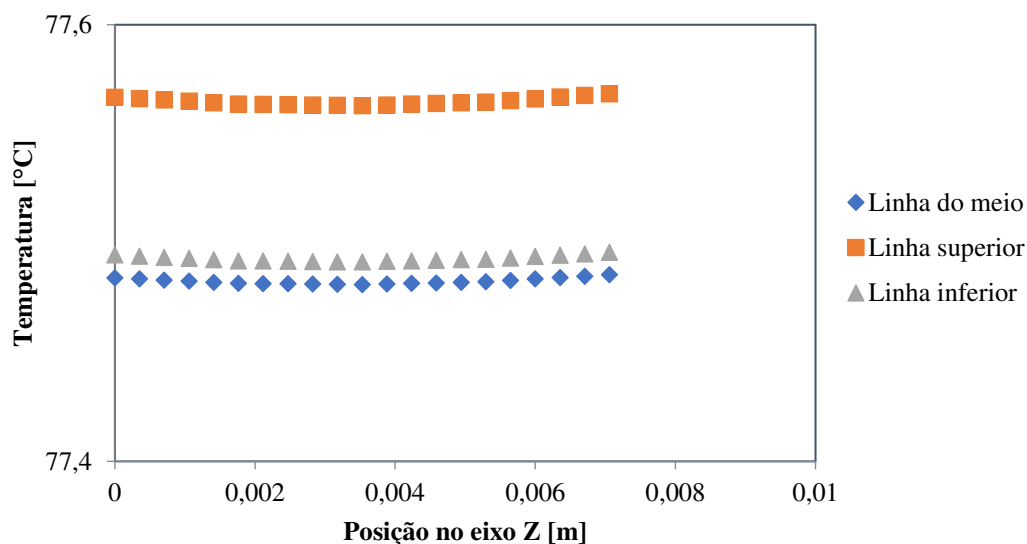
Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.42: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=60$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

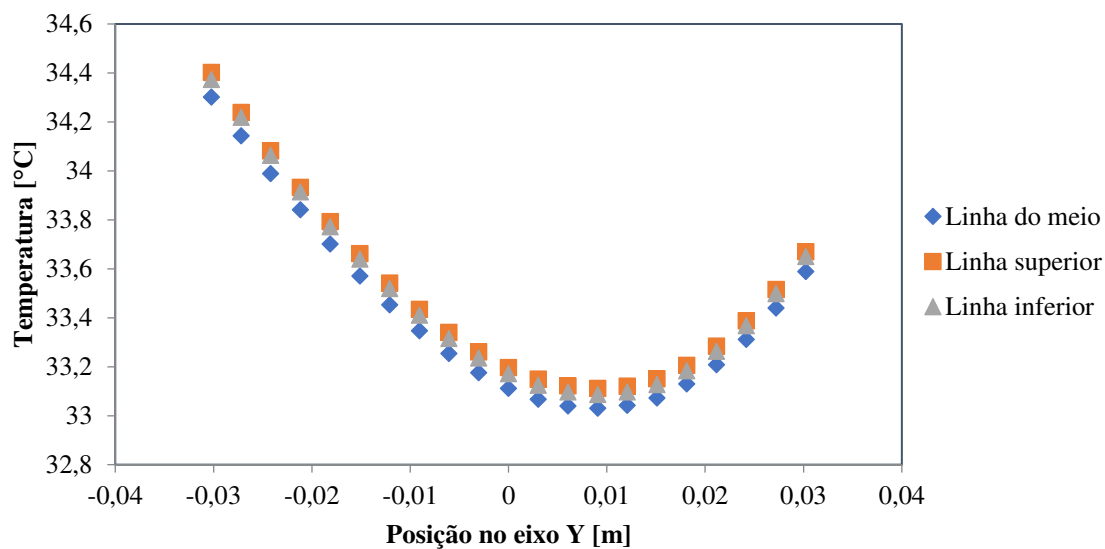
Figura 4.50: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=270$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

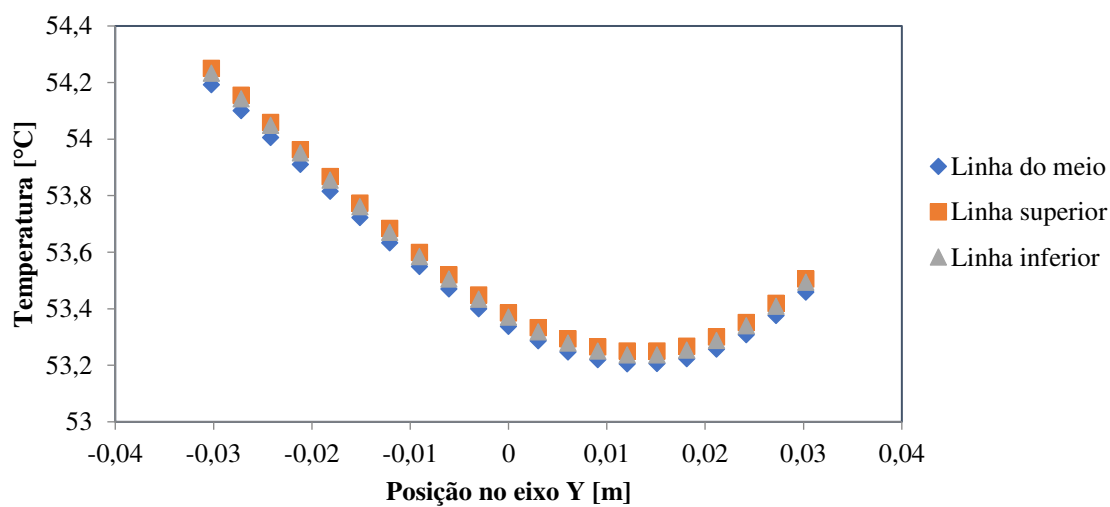
O comportamento térmico linear retratado na Fig. 4.1 para 80°C estão nas 3 figuras a seguir, em 10, 60 e 270 min. Mediante os gráficos, vê-se que as temperaturas nas três linhas tendem a se sobreporem, demonstrando-se bastante semelhantes. Vê-se, também uma tendência de curva que se aproxima de uma parábola com concavidade para cima e ponto mínimo deslocado para a direita na extensão do bloco cerâmico.

Figura 4.43: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=10$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$.



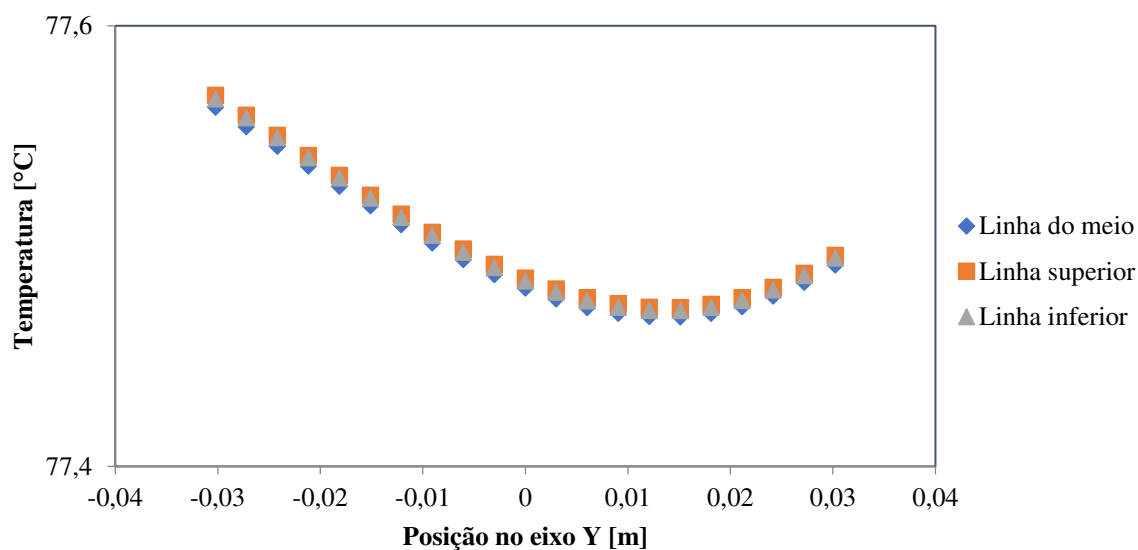
Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.44: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=60$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.45: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=270$ min e $T=80^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Acervo do autor, 2023.

4.4.2 Comportamentos térmico e mássico no bloco cerâmico em três planos para $T=80^{\circ}\text{C}$

4.4.2.1 Análise para os Planos XZ

Por meio da Fig. 4.6 são apresentados 5 planos, através dos quais foram retratados os comportamentos térmicos (Fig. 4.53; Fig. 4.54; Fig. 4.55; Fig. 4.56; Fig. 4.57) e mássicos (Fig. 4.58; Fig. 4.59; Fig. 4.60; Fig. 4.61; Fig. 4.62) apresentados a seguir.

Nas figuras (Fig. 4.53; Fig. 4.54; Fig. 4.55; Fig. 4.56; Fig. 4.57) apresentadas a seguir foi possível observar que, na totalidade dos planos analisados, o transporte calorífico ocorre da camada superficial do bloco para dentro no material. Vê-se que o gradiente térmico possui pouca intensidade, reduzindo assim, as sequelas de uma secagem não uniforme que ao proporcionarem gradientes pequenos de umidade podem reduzir os riscos de produzir fissuras e deformações, tanto durante a secagem quanto durante a queimagem. O mesmo aconteceu para a secagem a 60°C .

A camada superficial do bloco que se encontra defronte ao sentido da fase gasosa (plano XZ, em $y = -3,0225$ cm) possui um comportamento térmico mais elevado que a sua simetricamente oposta (plano XZ, em $y = 3,0225$ cm). Portanto, devido à assimetria do fornecimento calorífico provocada pela direção da fase gasosa, não se pode assumir campos de temperaturas e umidade (Fig. 4.58; Fig. 4.59; Fig. 4.60; Fig. 4.61; Fig. 4.62) semelhantes para todos os planos.

O aquecimento assimétrico no curso do eixo Y evidencia que o local do bloco cerâmico no interior do secador, bem como o sentido da fase gasosa que atravessa o secador afetam diretamente o comportamento térmico e, por consequência, o mássico.

Em todo curso da secagem para $T=80^{\circ}\text{C}$, vê-se que o interior do bloco mantém-se com temperaturas menores que as constatadas nas camas superficiais, entretanto com valores de umidade maiores que os observados nas extremidades do bloco. Embora haja uma evidente tendência de comportamento térmico e mássico ao longo dos planos analisados que se repetem, vê-se que os diferenciais térmicos e mássicos possuem valores que não são grandes o suficiente para proporcionar riscos de trincas, deformações e fissuras.

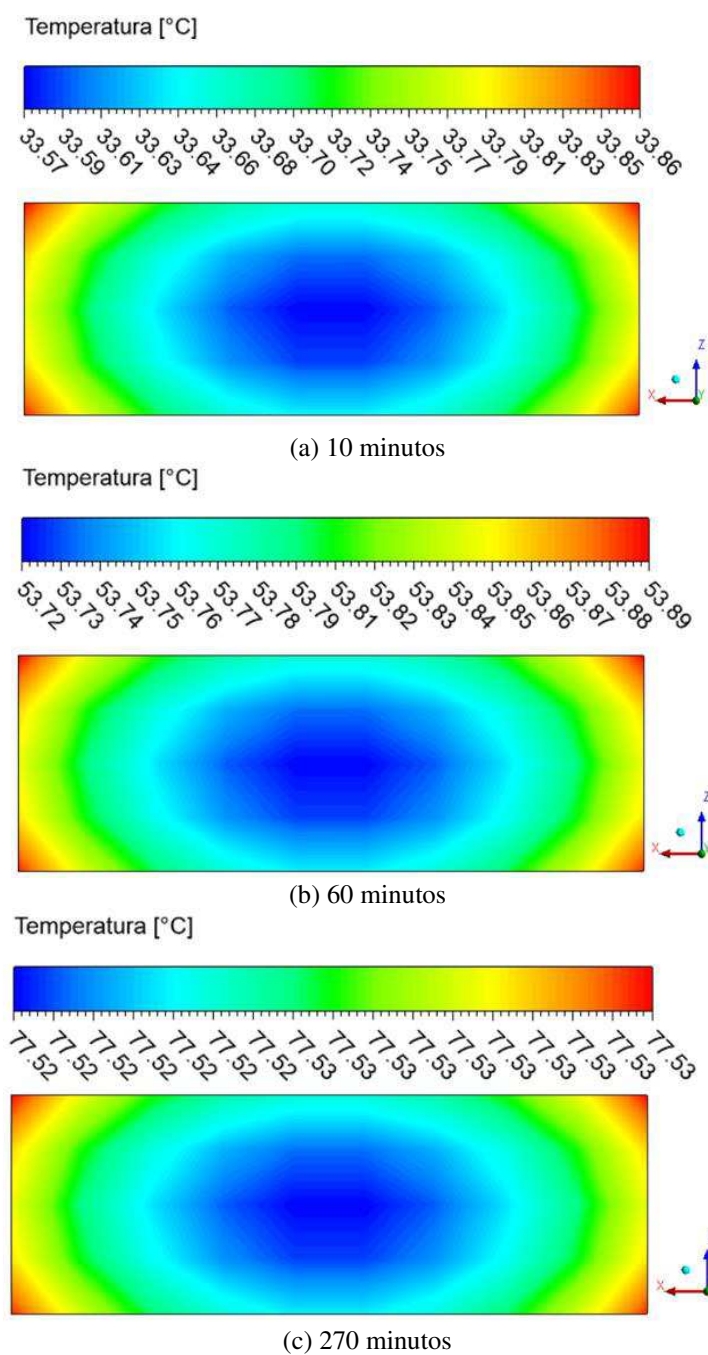
Comparando-se os planos XZ desde a superfície negativa ($y = -3,0225 \text{ cm}$) até a superfície positiva ($y = 3,0225 \text{ cm}$), vê-se que no início do processo o gradiente térmico tende a diminuir no sentido do eixo Y, que é o mesmo sentido da passagem da fase gasosa. Entretanto, quando o equilíbrio térmico e higroscópico é atingido em 270 min, o diferencial térmico nos planos citados se intercala entre os valores de $\Delta T = 0,01$ e $0,02^{\circ}\text{C}$.

No que concerne ao diferencial mássico ao compararmos os planos XZ desde a superfície negativa ($y = -3,0225 \text{ cm}$) até a superfície positiva ($y = 3,0225 \text{ cm}$), vê-se que ele tende a ser maior ao aproximar-se das superfícies, mas tende a diminuir em todos os planos com a aproximação do tempo total.

Tabela 4.7: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos XZ.

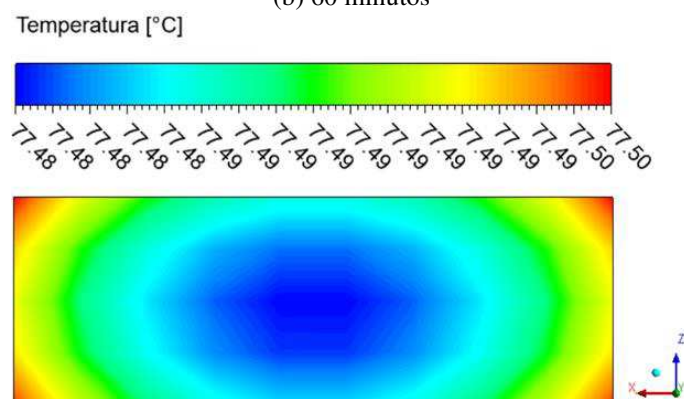
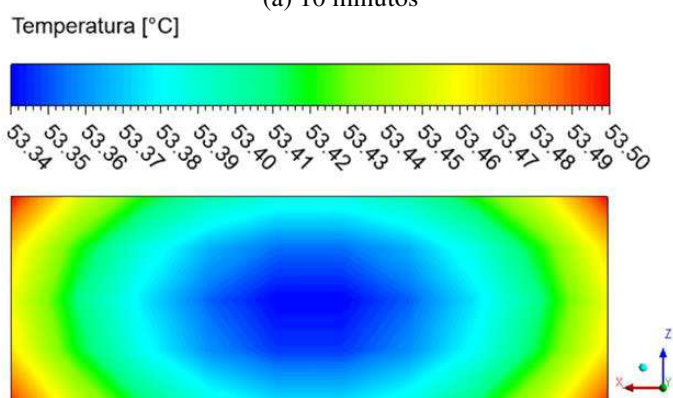
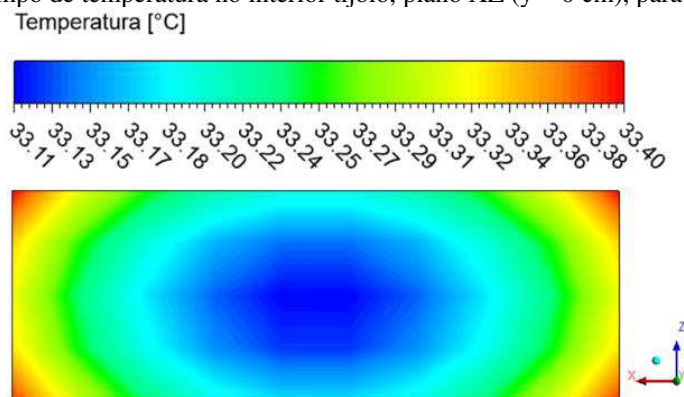
Posição do Plano XY [cm]	Tempo de Secagem a 80°C					
	10 min		60 min		270 min	
	ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	ΔM [g/g]	ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	ΔM [g/g]	ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	ΔM [g/g]
$y = -3,0225$	0,29	0,02384	0,17	0,00853	0,02	0,00015
$y = -1,51125$	0,29	0,02765	0,17	0,01195	0,01	0,00024
$y = 0$	0,29	0,02695	0,16	0,01320	0,02	0,00032
$y = 1,51125$	0,28	0,02600	0,15	0,01280	0,01	0,00033
$y = 3,0225$	0,25	0,02116	0,14	0,00940	0,01	0,00025

Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.55 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = -1,51125$ cm), para a secagem a 80°C .

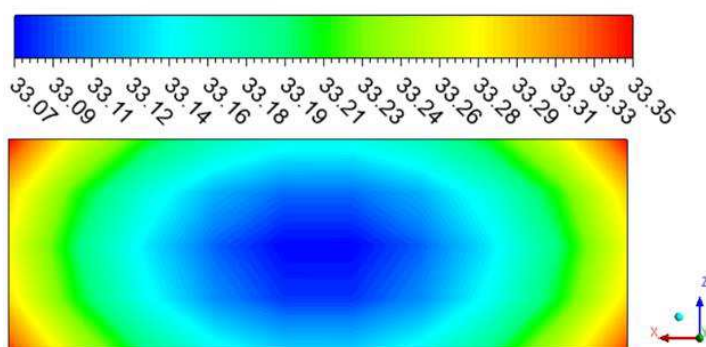
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.56 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = 0$ cm), para a secagem a 80°C .

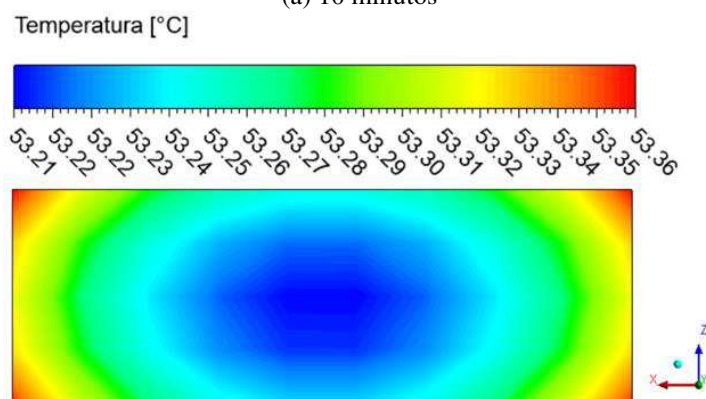


Fonte: acervo do autor, 2023.

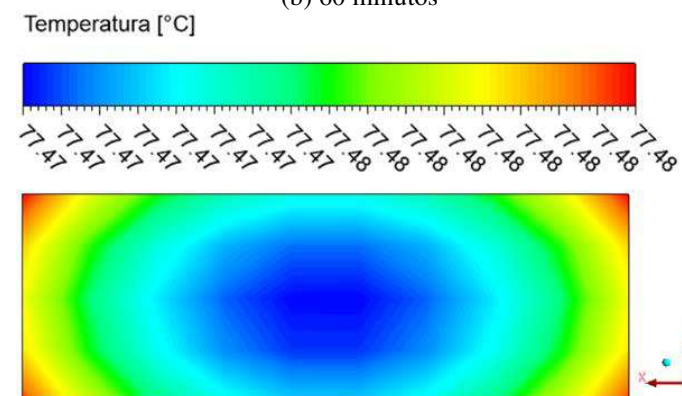
Figura 4.57 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = 1,51125$ cm), para a secagem a 80°C .
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]



(a) 10 minutos



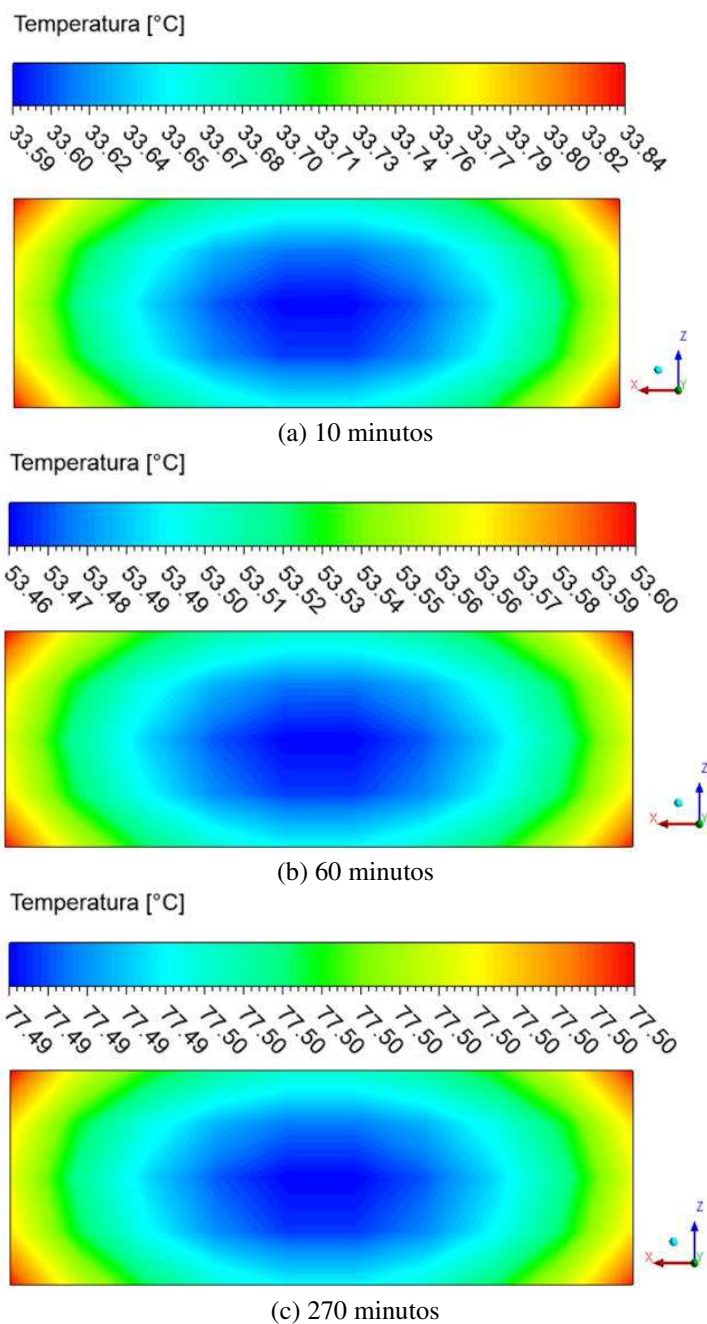
(b) 60 minutos



(c) 270 minutos

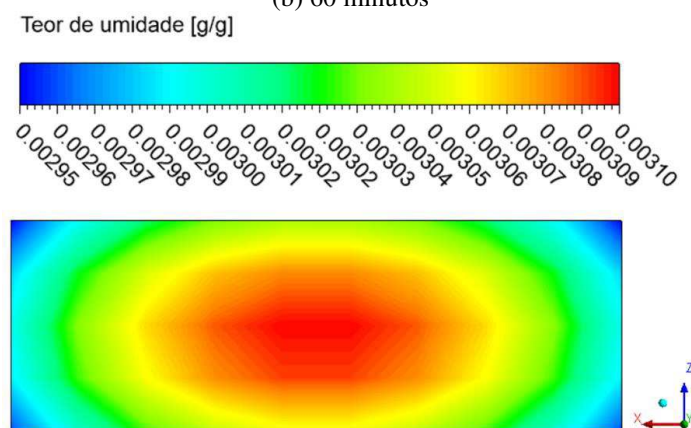
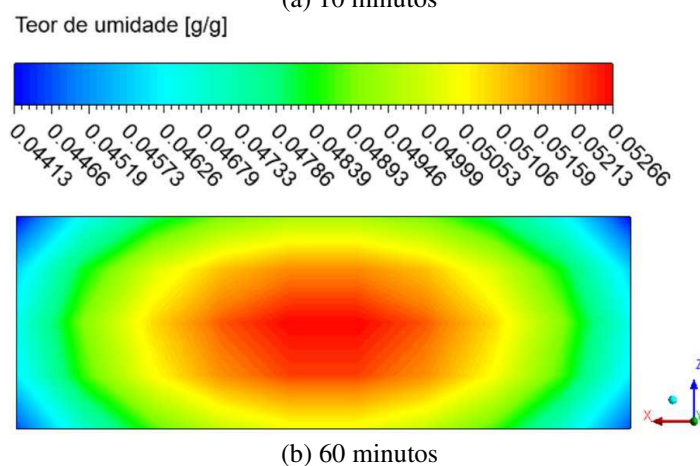
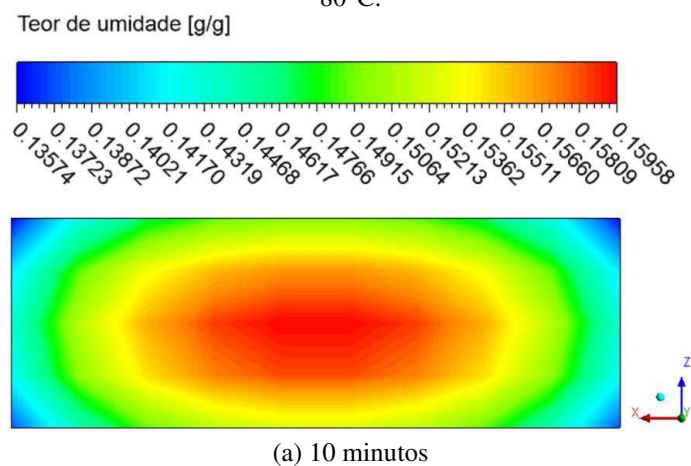
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.58 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = 3,0225$ cm), para a secagem a 80°C .



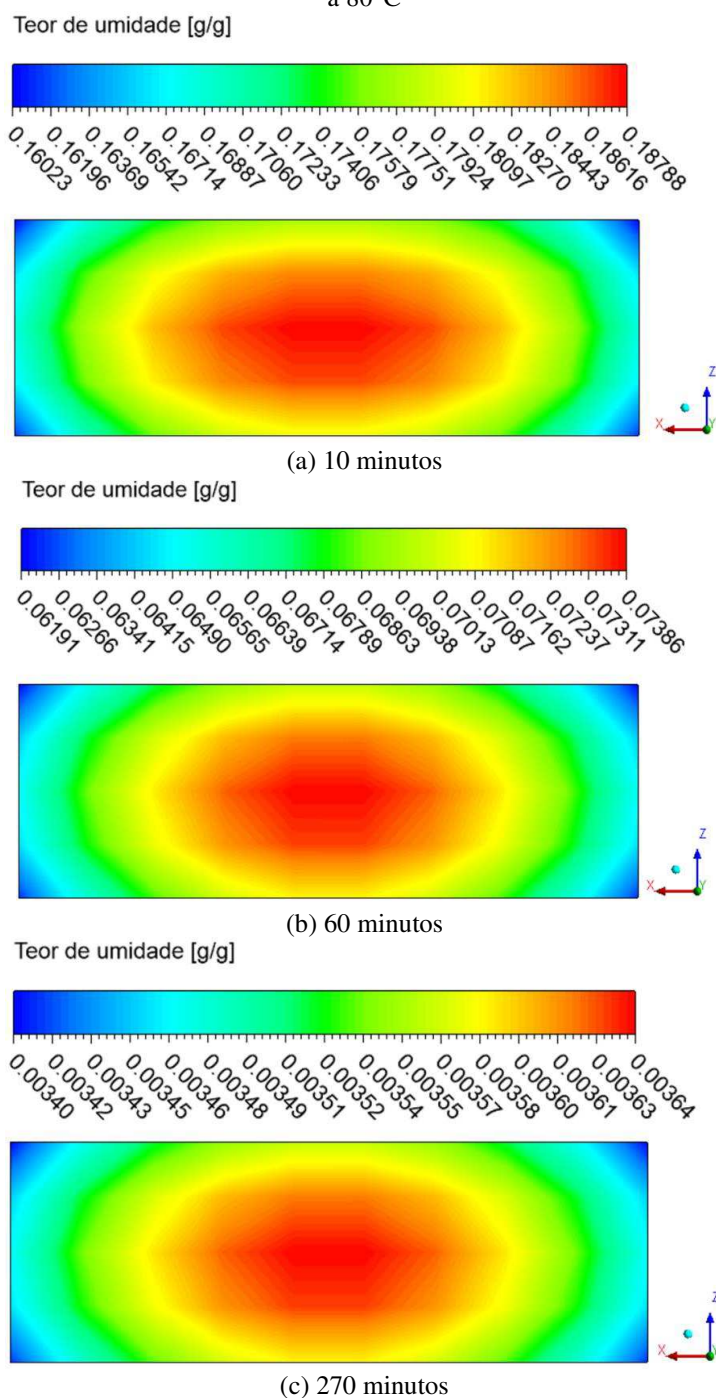
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.59 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($y = -3,0225$ cm), para a secagem a 80°C .



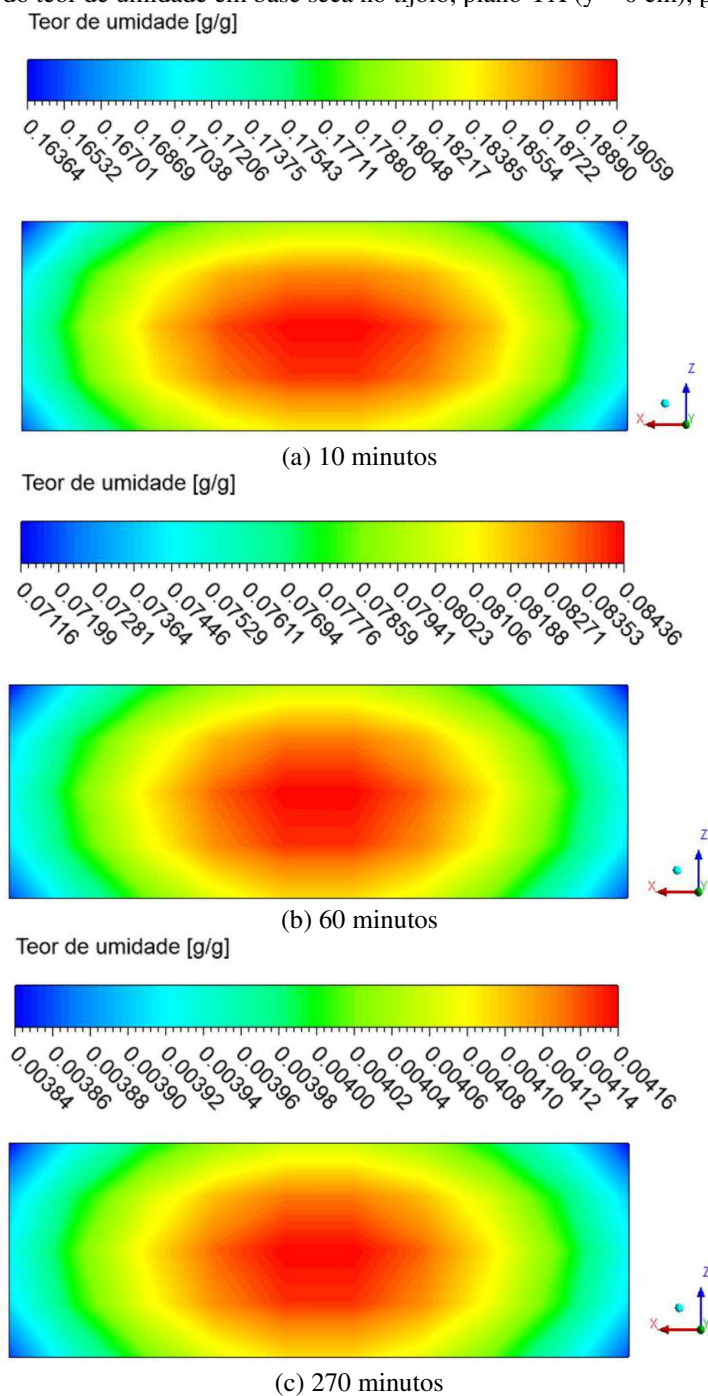
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.60 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($y = -1,51125$ cm), para a secagem a 80°C



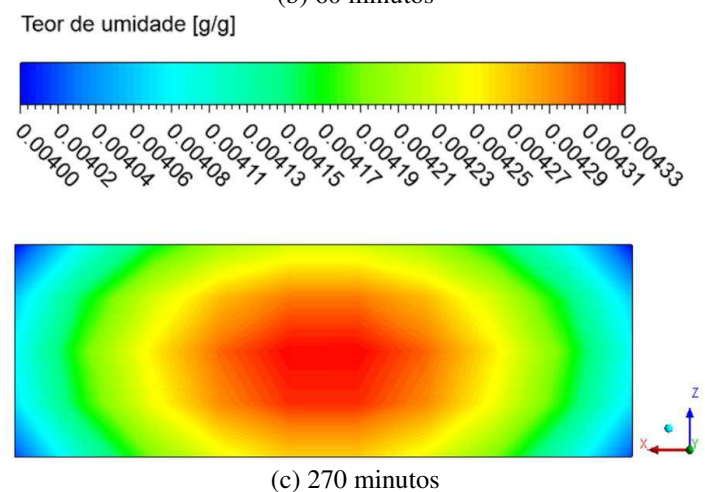
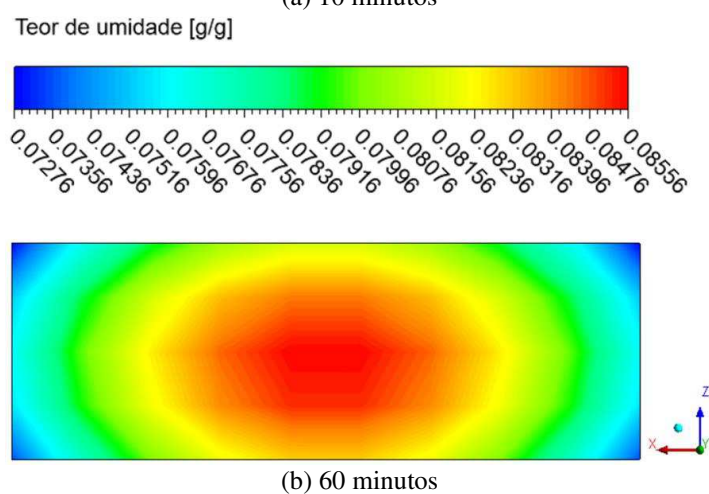
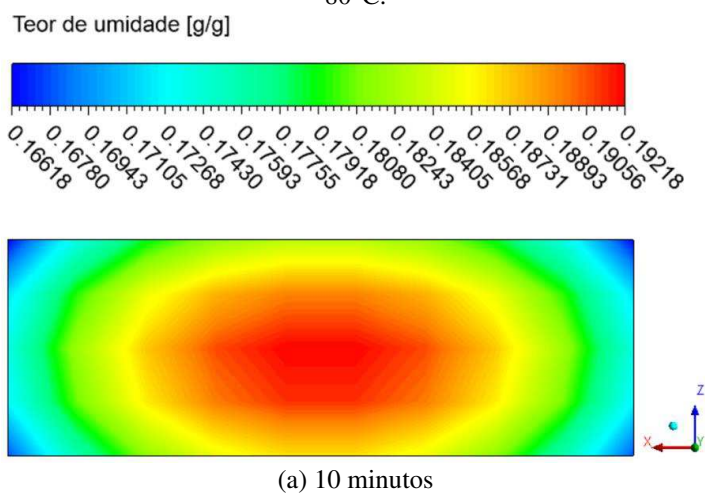
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.61 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($y = 0$ cm), para a secagem a 80°C .



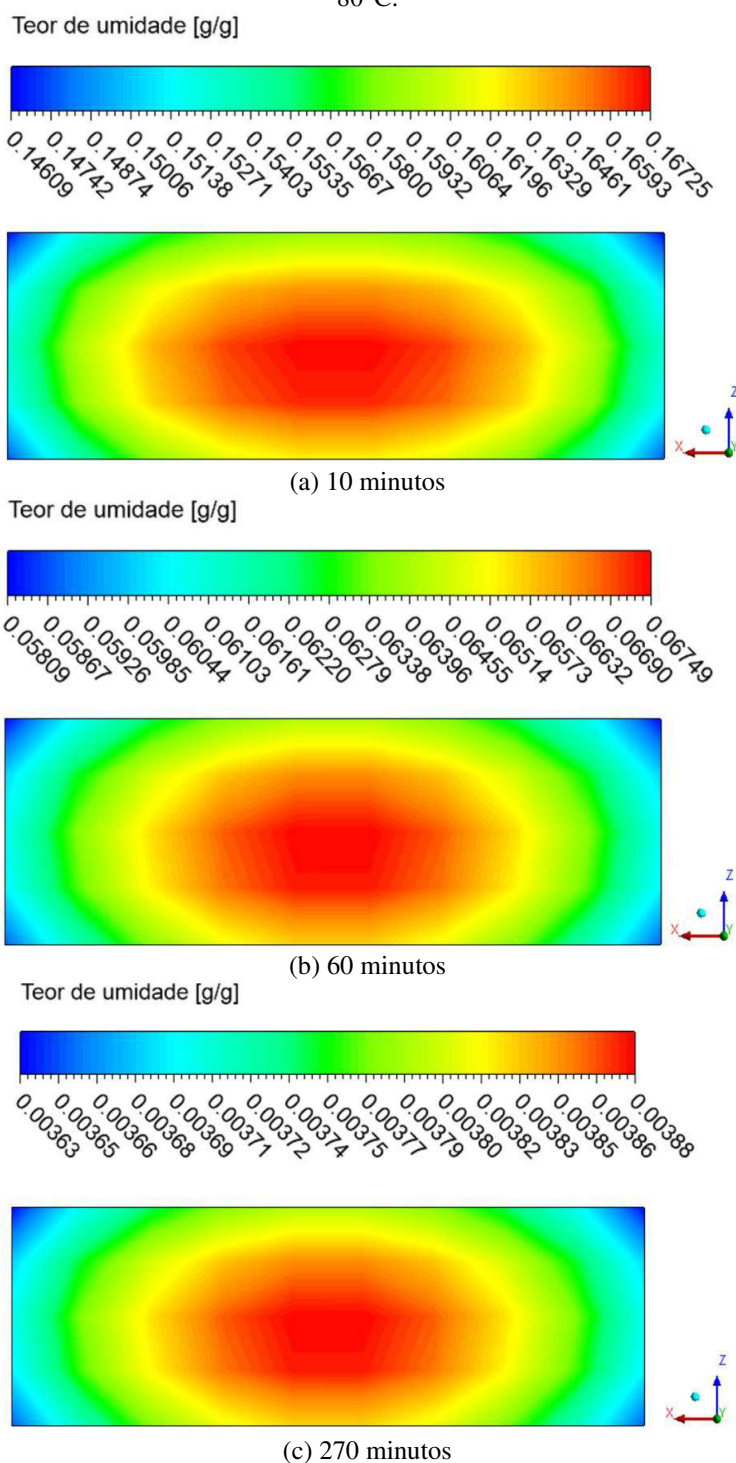
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.62 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($y = 1,51125$ cm), para a secagem a 80°C .



Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.63 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($y = 3,0225$ cm), para a secagem a 80°C .



Fonte: acervo do autor, 2023.

4.4.2.2 *Análise para os Planos YZ*

Nas seguintes imagens (Fig. 4.63; Fig. 4.64; Fig. 4.65) apresentadas foi possível observar, mediante o diferencial térmico, que assim como para 60°C, o transporte de calor se efetua das camadas superficiais do bloco em direção ao seu centro. Enquanto que, das figuras de umidade (Fig. 4.66; Fig. 4.67; Fig. 4.68), vê-se que o transporte mássico ocorre no sentido oposto.

Os valores máximos do gradiente do gradiente térmico e mássico são de modo respectivo, $\Delta T=1,37^{\circ}\text{C}$ e $\Delta M= 0,04248$, conforme Tab. 4.9. Essa secagem a 80°C produziu um gradiente máximo de temperatura com valor maior que o da secagem a 60°C e menor que o da secagem a 110°C.

Mediante uma análise nas figuras (Fig. 4.63; Fig. 4.64; Fig. 4.65), vê-se que a camada superficial do bloco que se encontra na lateral do bloco (plano YZ em $x = 1,0207$ cm) possui um comportamento térmico levemente mais elevado que os campos de temperatura dos outros dois planos ZY ($x = 0,5135$ cm; $x = 0$ cm) que se aproximam do do meio do bloco.

Assim, como ocorre na secagem a 60°C, os planos ZY, tanto para temperatura quanto para umidade, apresentam os maiores valores deslocados, respectivamente, para a esquerda e direita das figuras. Isso ocorre devido à assimetria da distribuição de calor provocada pelo sentido da passagem da fase gasosa quente que ocorre da esquerda para a direita nesses planos.

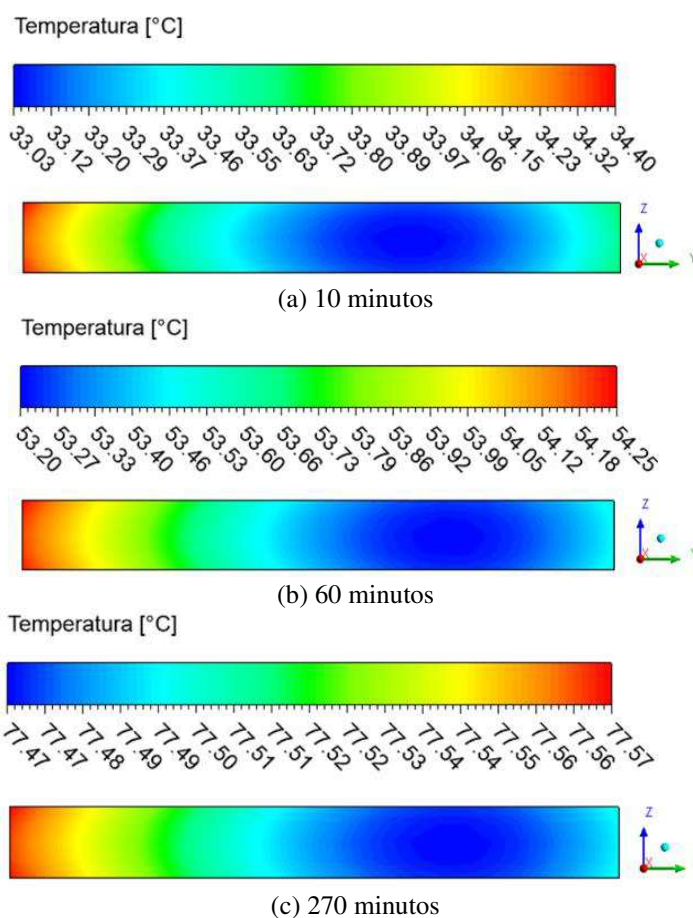
Com relação à umidade, percebe-se que nos três instantes de tempo analisados para a temperatura de 110°C, o perfil do teor de umidade é maior nos planos que se aproximam do centro do tijolo, e menor nos locais que se aproximam da superfície (Fig. 4.66; Fig. 4.67; Fig. 4.68). E que esses perfis de umidade possuem valores menores que os perfis das secagens a 60 e 80°C.

Comparando-se os planos YZ desde a superfície lateral ($x = 1,0207$ cm) até a superfície situada no centro do tijolo ($x = 0$ cm), percebe-se que os gradientes de temperatura e de umidade diminuem tanto à medida que o tempo passa, quanto à medida que a posição do plano se aproxima da superfície. O seu menor valor para temperatura e teor de umidade são respectivamente $\Delta T = 0,10^{\circ}\text{C}$, e $\Delta M= 0,00114$ g/g.

Tabela 4.8: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos YZ.

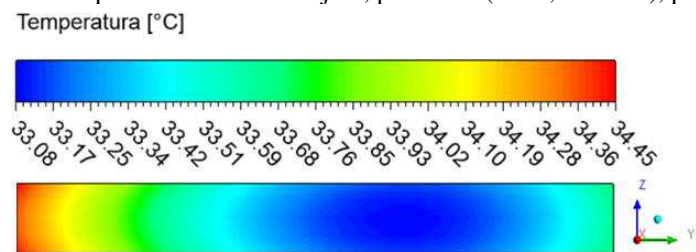
Posição do Plano ZY [cm]	Tempo de Secagem a 80°C					
	10 min		60 min		270 min	
	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]
X = 0,00	1,37	0,04248	1,05	0,03708	0,10	0,00130
X = 0,5135	1,37	0,04103	1,04	0,03581	0,10	0,00126
X = 1,0270	1,36	0,03809	1,04	0,03268	0,10	0,00114

Fonte: acervo do autor, 2023.

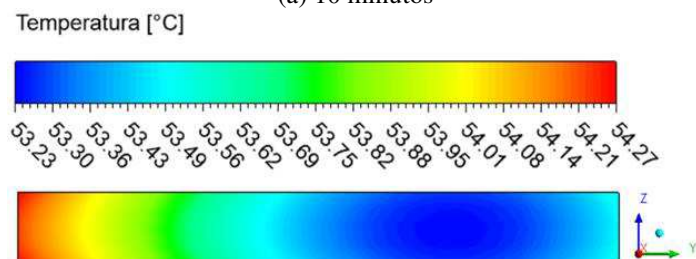
Figura 4.64 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY ($x = 0$ cm), para a secagem a 80°C.

Fonte: Acervo do autor, 2023.

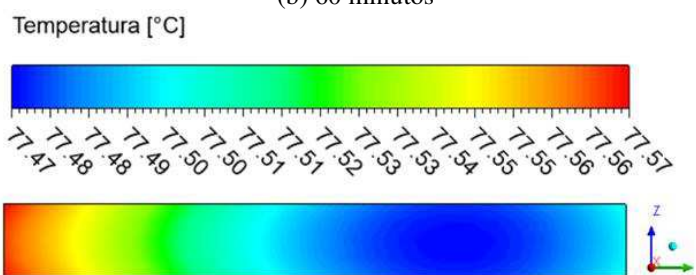
Figura 4.65 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 80°C .



(a) 10 minutos



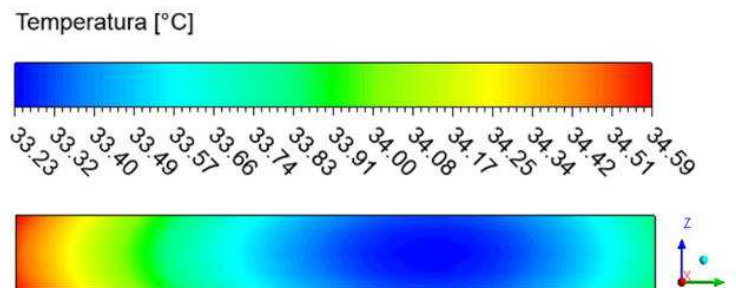
(b) 60 minutos



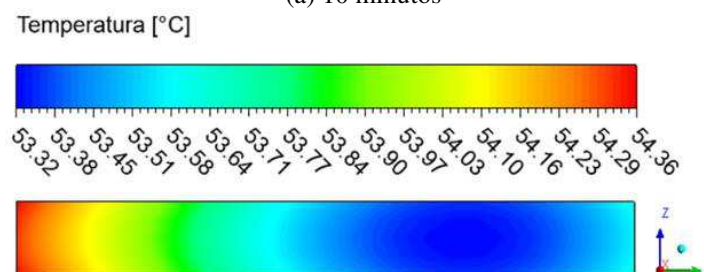
(c) 270 minutos

Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.66 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 80°C .



(a) 10 minutos



(b) 60 minutos

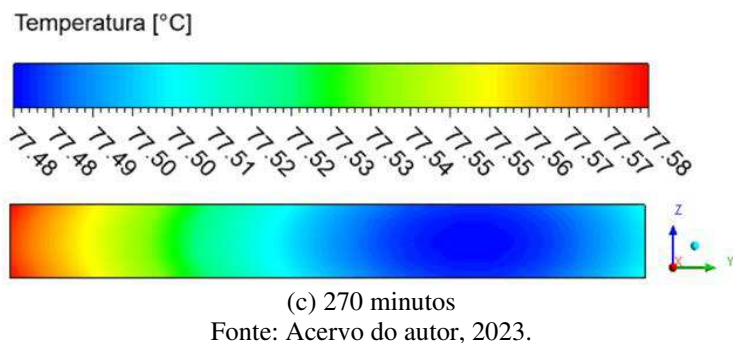


Figura 4.67 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY ($x = 0$ cm), para a secagem a 80°C.

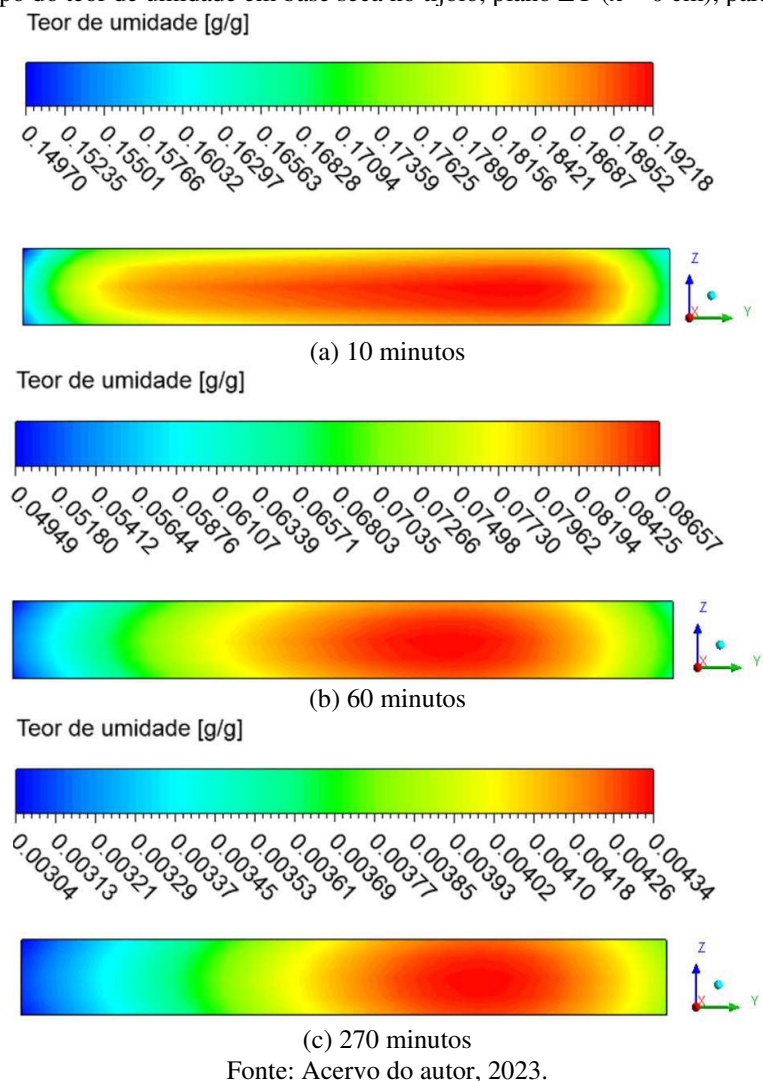
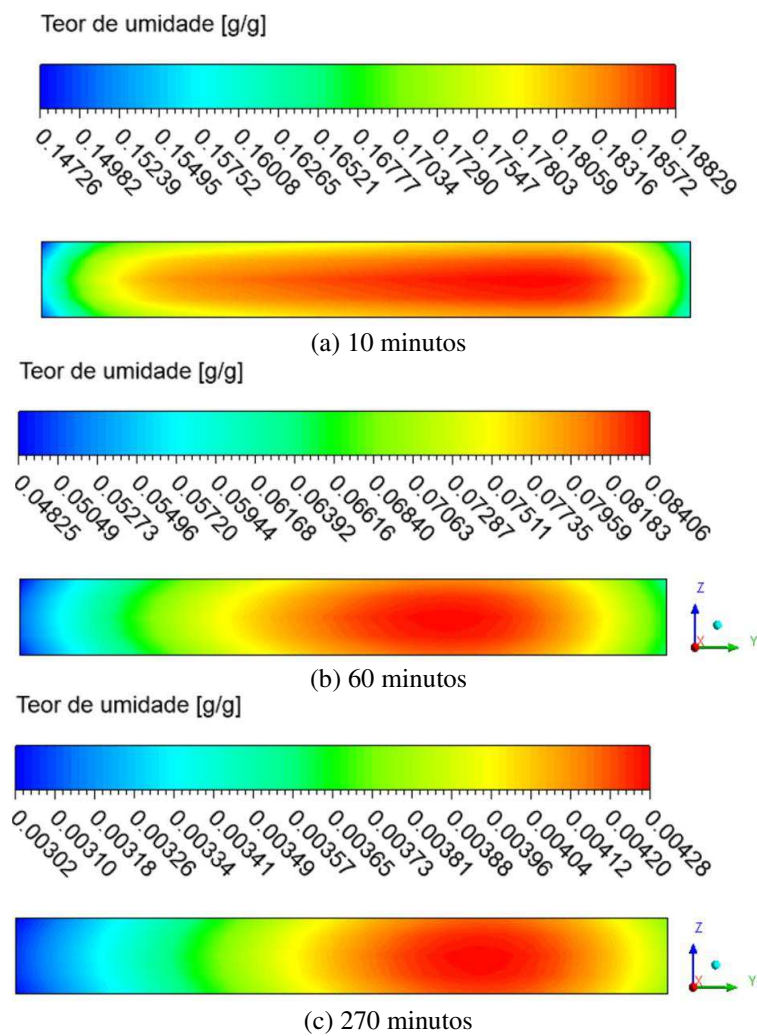
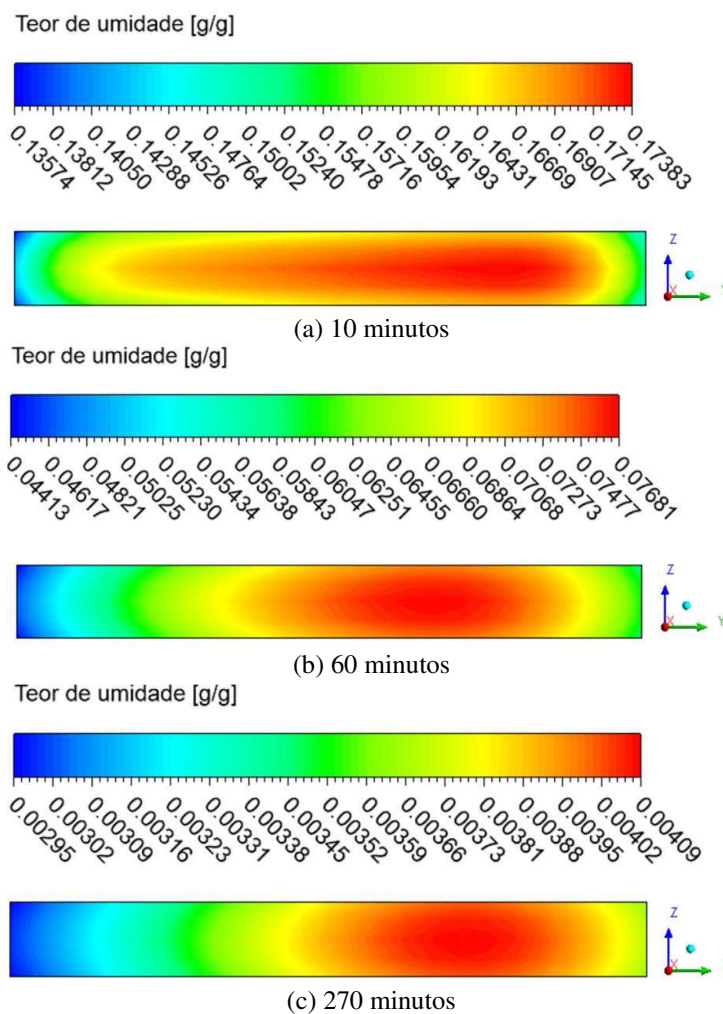


Figura 4.68 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 80°C .



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.69 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 80°C .



Fonte: Acervo do autor, 2023.

4.4.3.3 Análise para os Planos YZ

Nas figuras (Fig. 4.69; Fig. 4.70; Fig. 4.71) apresentadas a seguir foi possível observar que, assim como para a secagem a 60°C , o transporte calorífico ocorre das camadas superficiais do bloco em direção ao interior. Enquanto, por meio das figuras de umidade (Fig. 4.72; Fig. 4.73; Fig. 4.74), vê-se que o transporte mássico ocorre de maneira mais intensa próximo as superfícies, sendo possível a visualização de gradientes mássicos em todos os planos observados.

Mediante uma análise nas figuras (Fig. 4.69; Fig. 4.70; Fig. 4.71), vê-se que a camada superficial que se encontra na parte superior do bloco (plano XY em $z=0,706$) possui um comportamento térmico levemente mais elevado que as temperaturas que se aproximam do

interior do bloco. Sendo o inverso deste comportamento também percebido para os campos de teor de umidade que são maiores próximos ao centro e menores próximos as superfícies.

Os planos XY apresentam para temperatura e umidade os maiores valores deslocados, respectivamente para a direita e esquerda das figuras. Isso ocorre devido a assimetria da distribuição de calor provocada pelo sentido de passagem da fase gasosa quente que ocorre da esquerda para a direita nesses planos.

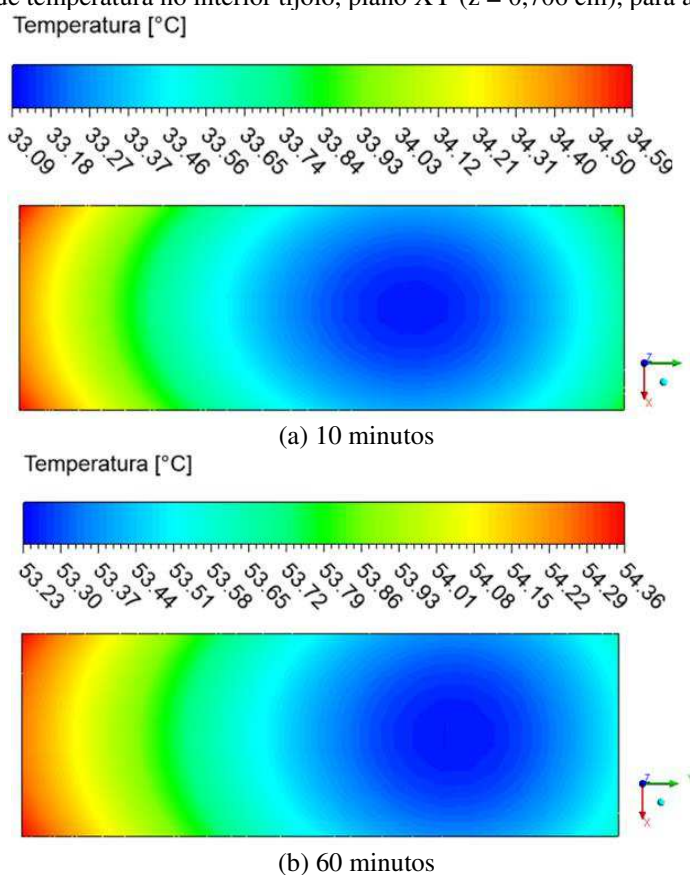
Comparando-se os planos XY desde a superfície superior ($z=0,706$) até o plano situado no meio do bloco cerâmico ($y=0,353$), vê-se que o gradiente térmico e mássico diminui à medida que tempo passa e a posição dos planos se aproximam do interior do bloco.

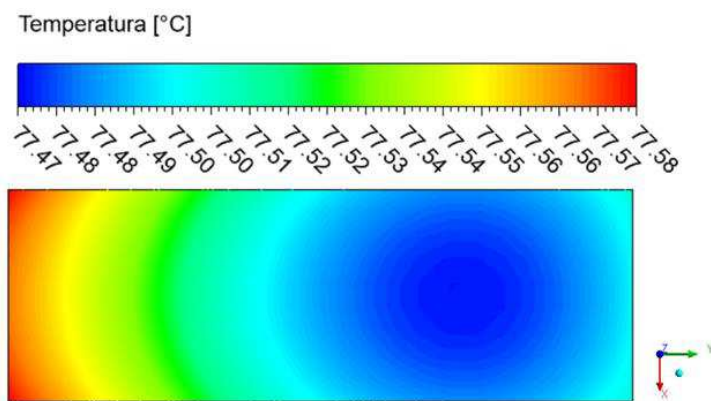
Tabela 4.9: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos XY.

Posição do Plano XY [cm]	Tempo de Secagem a 80°C					
	10 min		60 min		270 min	
	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]
$z = 0,706$	1,50	0,05095	1,13	0,03990	0,11	0,00132
$z = 0,5295$	1,48	0,04841	1,10	0,03954	0,11	0,00133
$z = 0,353$	1,48	0,04901	1,11	0,04010	0,10	0,00135

Fonte: Acervo do autor, 2023.

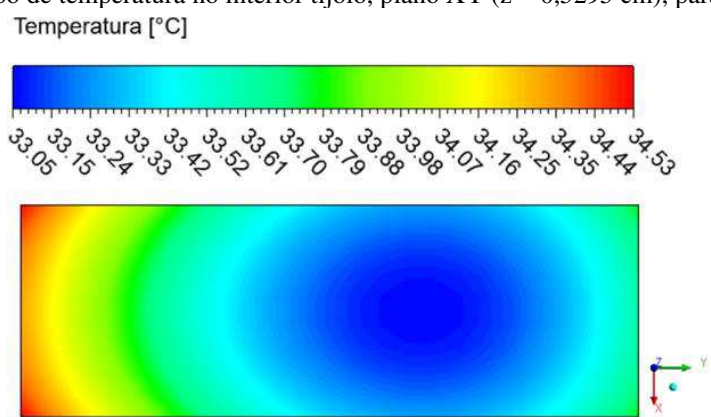
Figura 4.70 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano XY ($z = 0,706$ cm), para a secagem a 80°C.



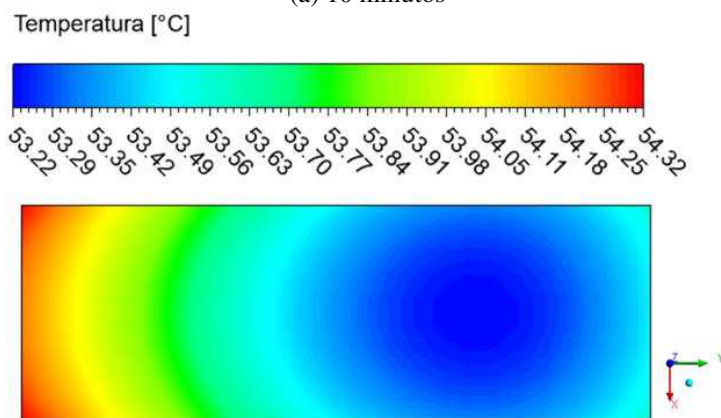


(c) 270 minutos

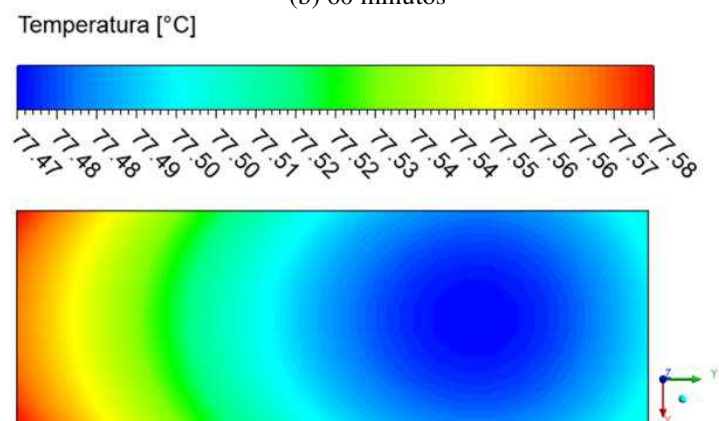
Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.71 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano XY ($z = 0,5295$ cm), para a secagem a 80°C .

(a) 10 minutos

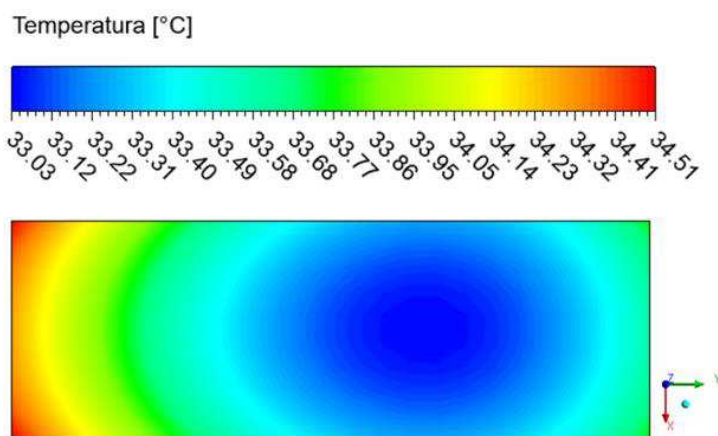


(b) 60 minutos

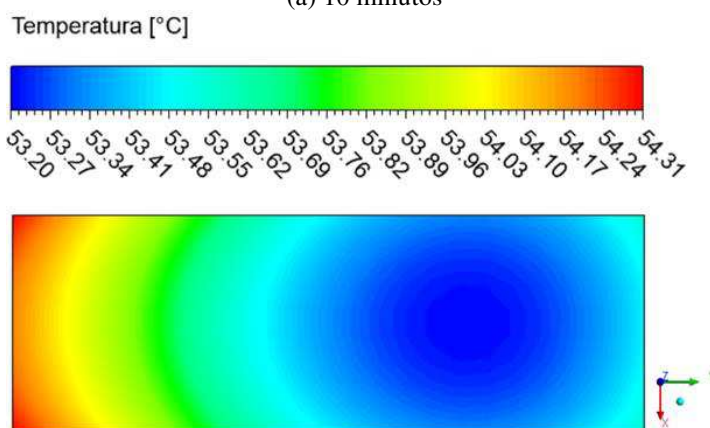


(c) 270 minutos
 Fonte: Acervo do autor, 2023.

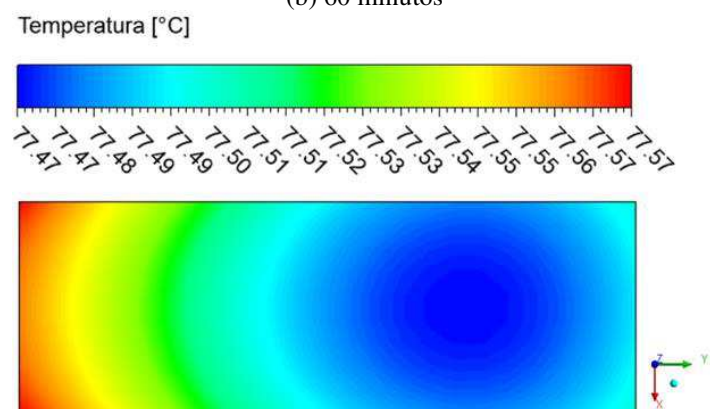
Figura 4.72 – Campo de temperatura no interior tijolo, plano XY ($z = 0,353$ cm), para a secagem a 80°C .



(a) 10 minutos



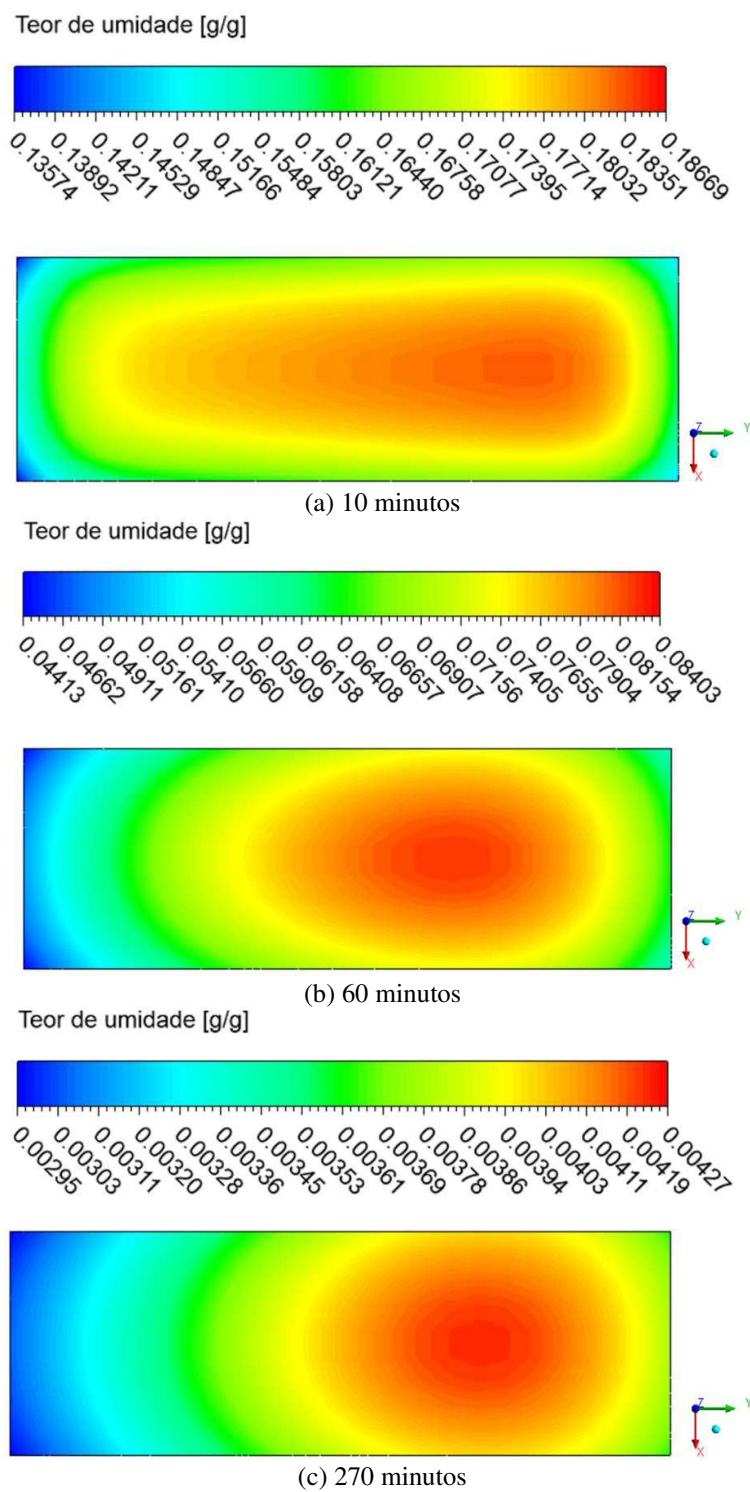
(b) 60 minutos



(c) 270 minutos

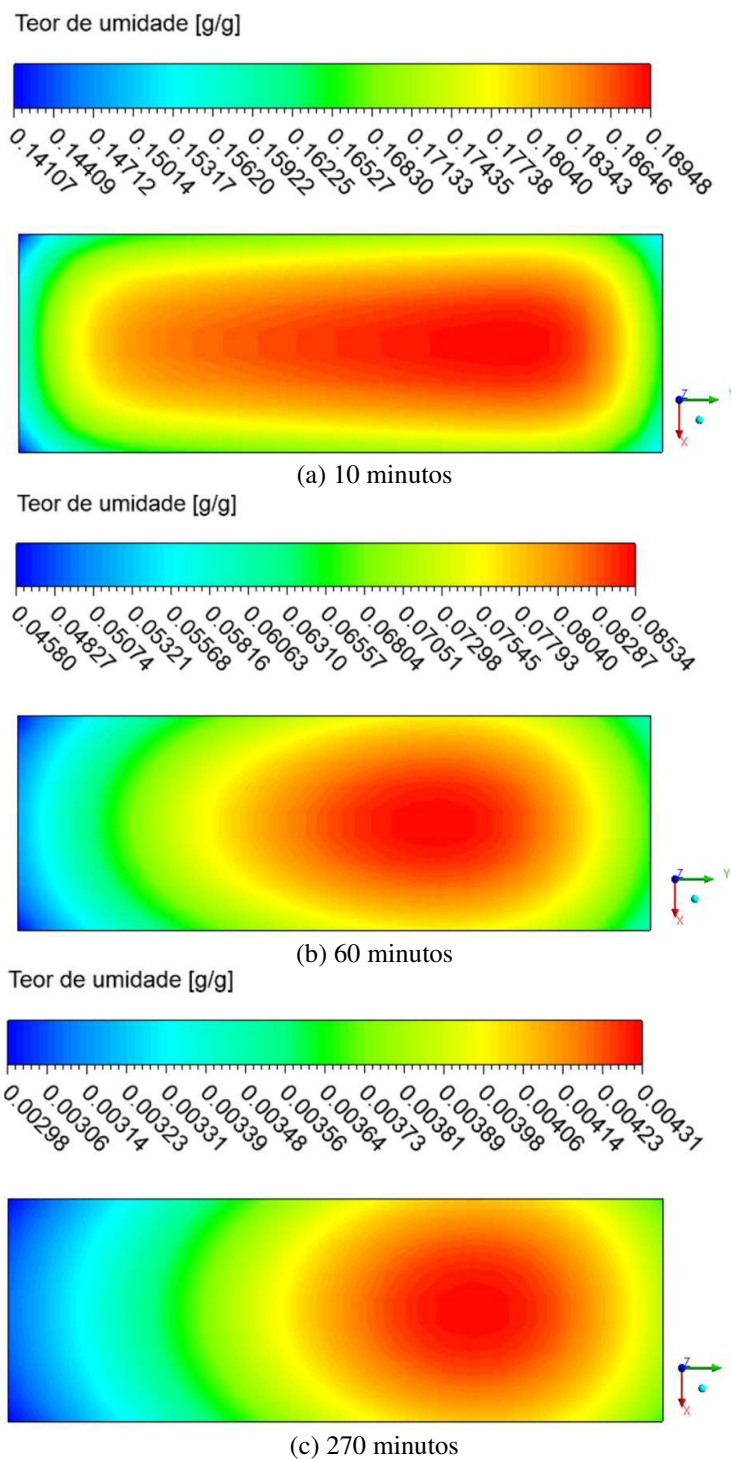
Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.73 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,706$), para a secagem a 80°C .



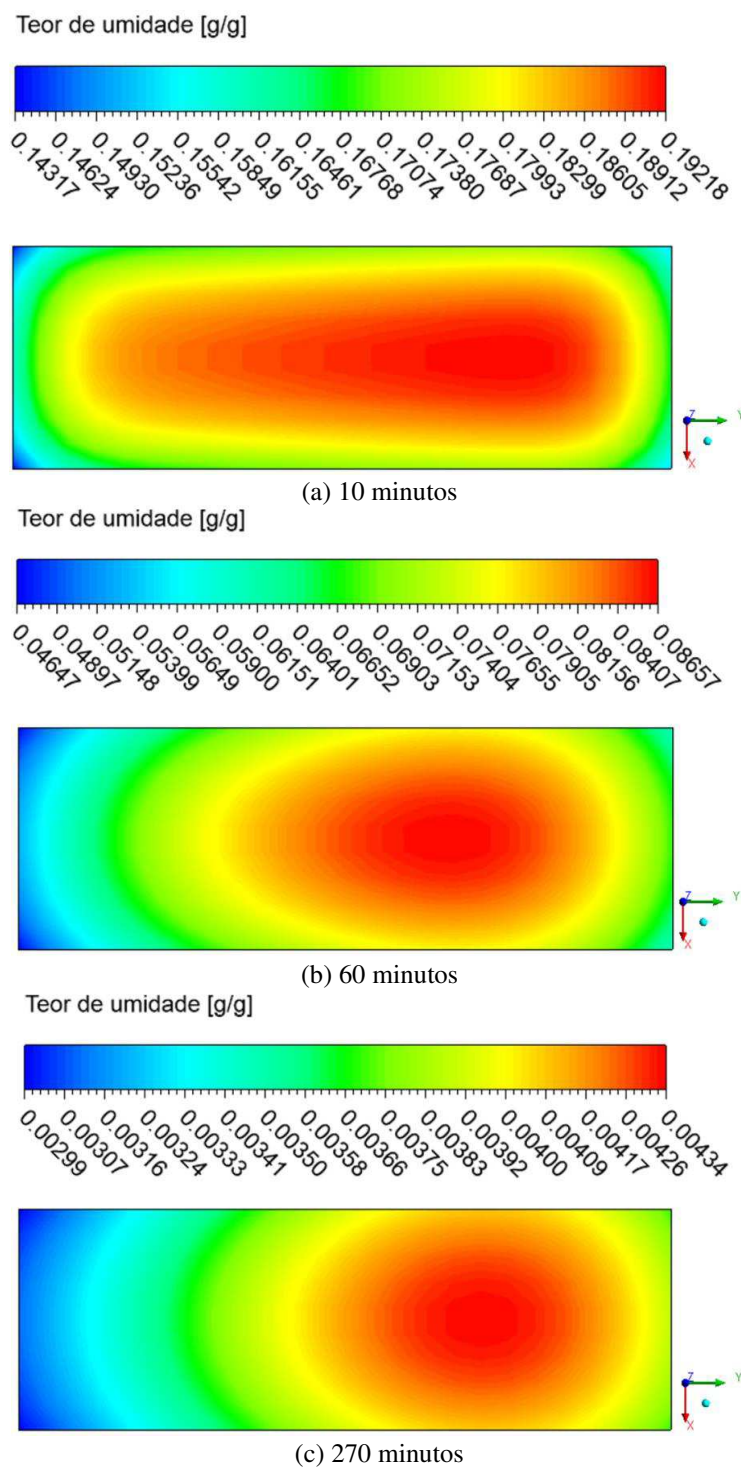
Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.74 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,5295$), para a secagem a 80°C .



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.75 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,353$ cm), para a secagem a 80°C .



Fonte: Acervo do autor, 2023.

4.5 Caso 3 (Argila Vermelha, T = 110°C)

4.5.1 Evolução Cinética de Secagem e Aquecimento do bloco cerâmico

A Fig. 4.75 ilustra a comparação entre os valores preditos, mediante modelagem matemática, e os valores empíricos encontrados por Nascimento (2001) da concentração aquosa média no decurso do processo de desumidificação dos blocos cerâmicos submetidos a T=110°C, referente ao Caso 1 das Tabelas 3.1 e 3.2.

Uma análise quantitativa dos dados presentes na Fig. 4.75 foi realizada mediante avaliação estatística utilizando o erros médio e relativo, incluindo variância dos quadrados dos resíduos bem como correlação de Pearson (Tab. 4.11). Dessa forma, pode-se perceber que essa avaliação estatística tende a confirmar o bom ajuste entre ambas as pesquisas, validando o modelo sugerido no presente trabalho para as condições operacionais de T=110°C e umidade relativa correspondente a 2%.

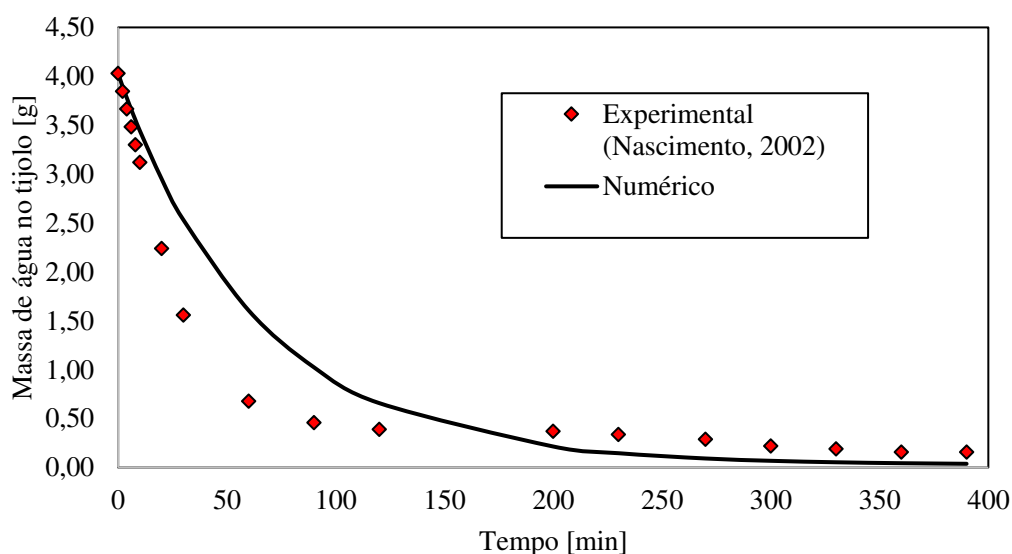
Tabela 4.10: Parâmetros da análise quantitativa para secagem a 110°C.

Temperatura de Secagem a 110°C			
E_m	$ERMQ$	δV	r_p
34,23	3,01	0,18	0,98

Fonte: acervo do autor, 2023.

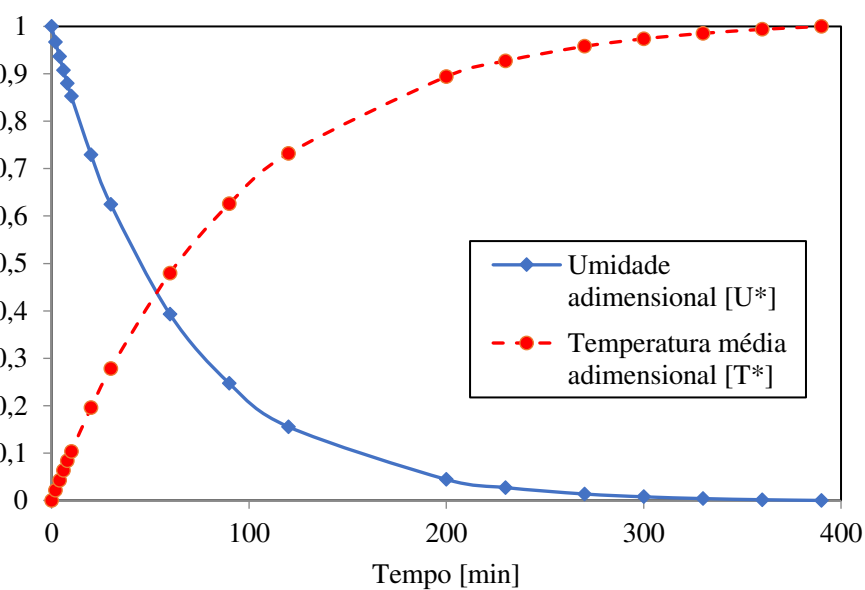
Vê-se uma concordância lógica de simetria em ambas as curvas retratadas na Fig. 4.75 já que à medida que há o fornecimento de calor e aumenta sua temperatura, ele perde massa de água diminuindo sua umidade. Assim, no instante de aproximadamente 390 minutos, o material atinge seu equilíbrio térmico e mássico.

Figura 4.46: Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade no decurso do tempo (Caso 3).



Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.47: Predição do teor de umidade médio e temperatura média do bloco cerâmico no decurso do tempo total (Caso 3).



Fonte: acervo do autor, 2023.

4.5.1 Perfil linear de evolução térmica no bloco cerâmico

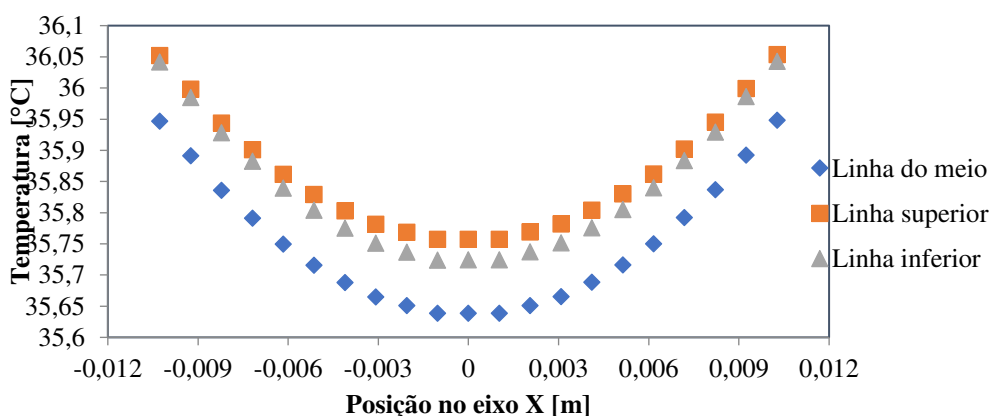
O comportamento térmico linear retratado nas 3 imagens a seguir, acontecem nas condições de $T=110^{\circ}\text{C}$ para $t=10$ min, $t=60$ min e $t=390$ min.

Mediante os gráficos, vê-se que no decurso do eixo X existe uma tendência à simetria, onde a temperatura é maior nas extremidades deste eixo, ou seja, nas duas superfícies laterais do bloco cerâmica, e menor na posição $x = 0$ cm, ou seja dentro do bloco cerâmico. Em 390

min, o comportamento térmico tende a se linearizar para as três linhas, isso acontece perto de $T=77,5^{\circ}\text{C}$.

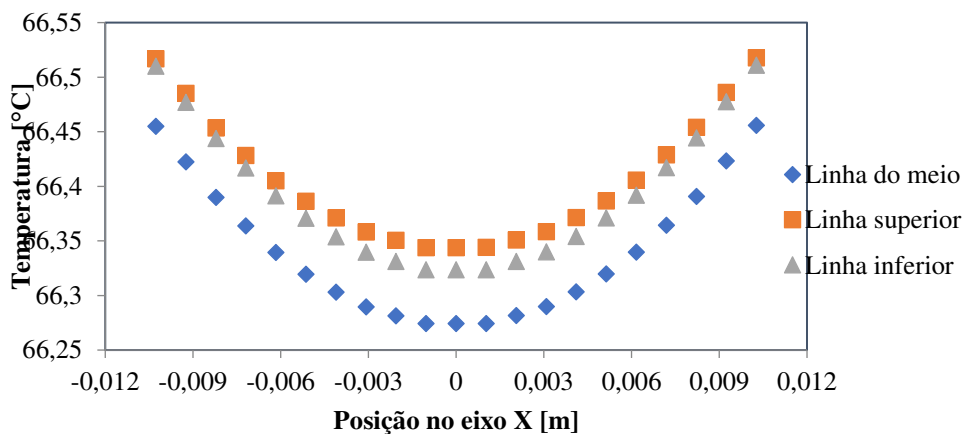
Assim como para a secagem a 60 e 80°C (Caso 3), as curvas possuem a forma de uma parábola com concavidade voltada para cima, ou seja, os pontos localizados nas extremidades das linhas (faces do tijolo) atingem mais rapidamente o equilíbrio térmico que em outros locais do bloco cerâmico.

Figura 4.48: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=10$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.



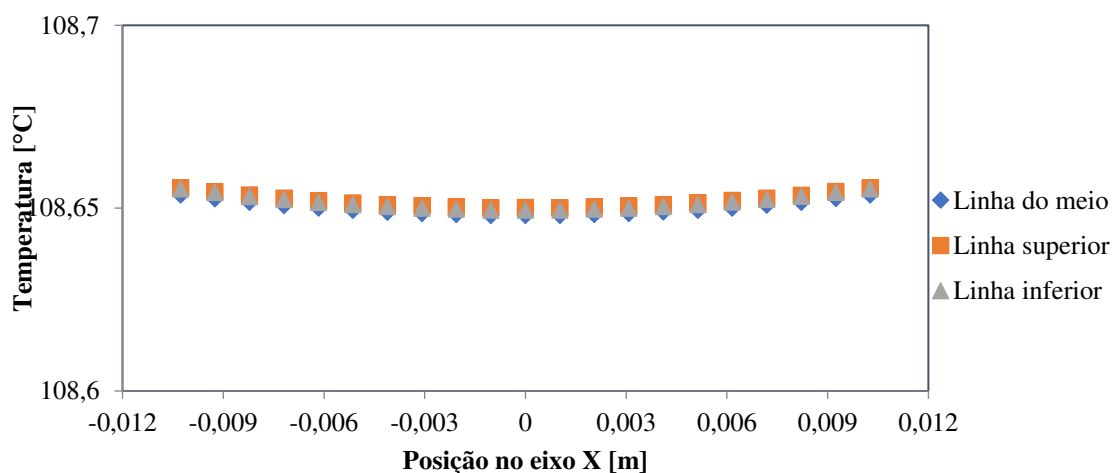
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.49: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=60$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

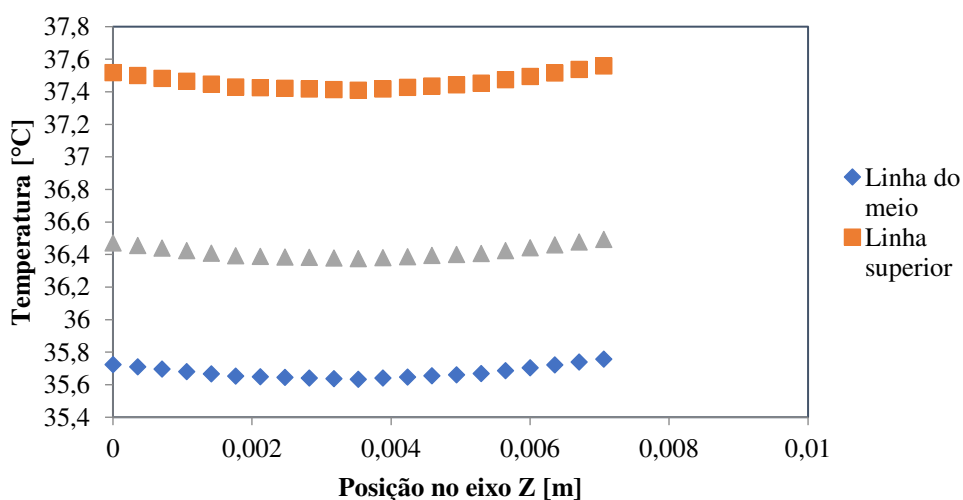
Figura 4.80: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 1, 2, 3, em $t=270$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

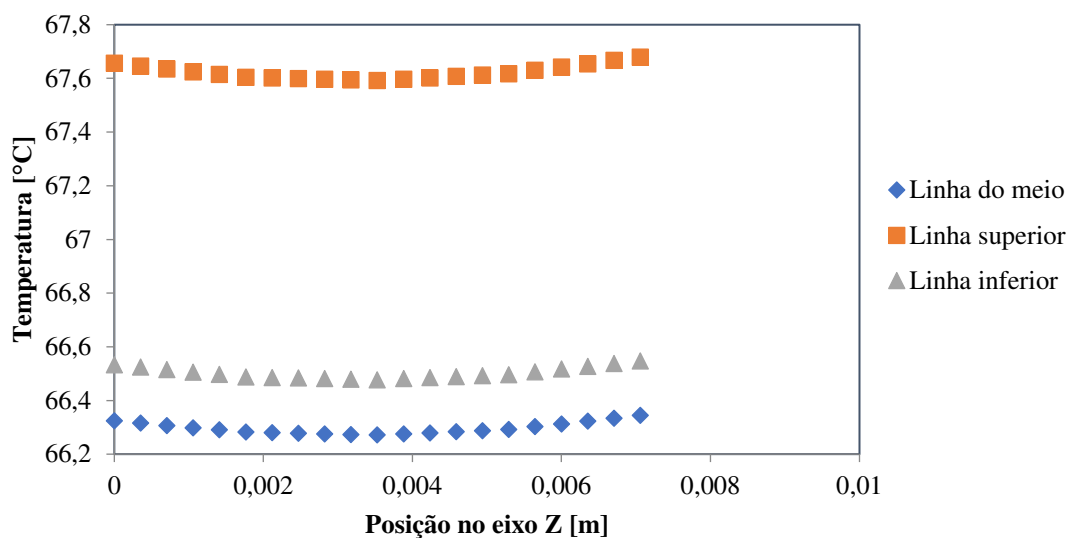
Nas próximas 3 imagens é apresentado o comportamento térmico linear mencionado na Fig. 4.2, para $T=110^{\circ}\text{C}$ em 10, 60 e 390 min. Mediante os gráficos, vê-se que os gradientes térmicos na extensão da mesma linha são praticamente nulos, motivo provavelmente justificado por conta da localização da linha que se encontra perpendicular ao sentido de deslocamento da fase gasosa, por conseguinte, o transporte calorífico acontece simultaneamente na totalidade dos pontos ao longo destas linhas. A linha situada na camada superficial do bloco cerâmico que se encontra no plano XZ em $y = -3,14551$, Fig. 4.6, mantém um comportamento térmico mais elevado que as outras, devido ao contato da fase gasosa ser maior nas camadas superficiais.

Figura 4.50: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=10$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.



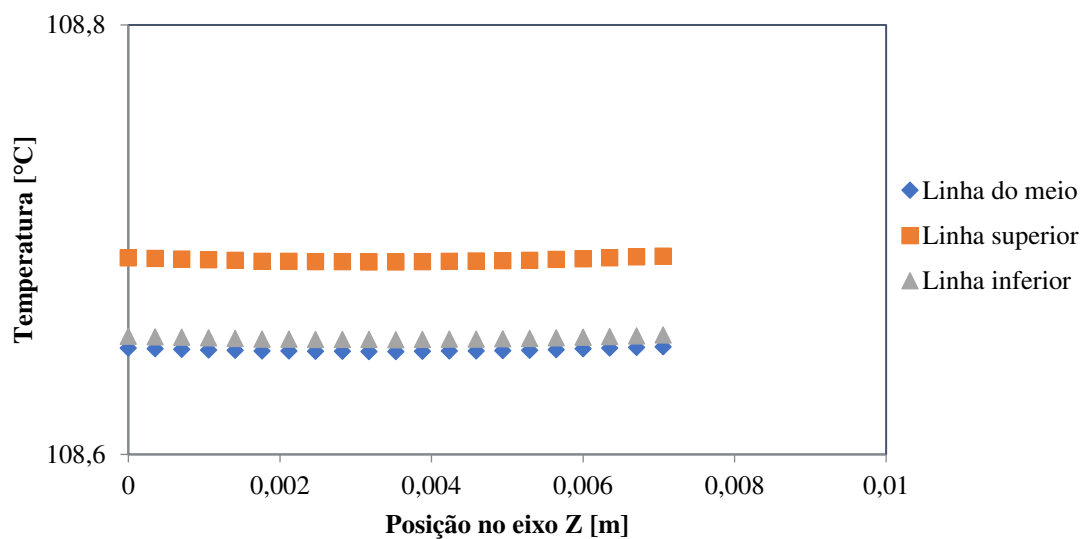
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.51: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t=60$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

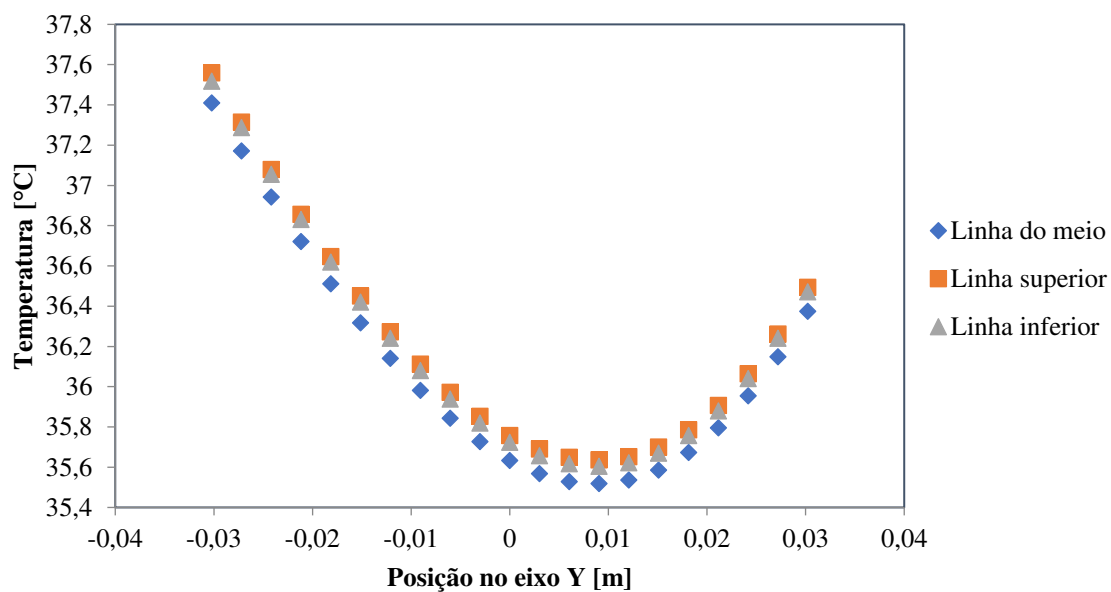
Figura 4.52: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 4, 5, 6, em $t = 270$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

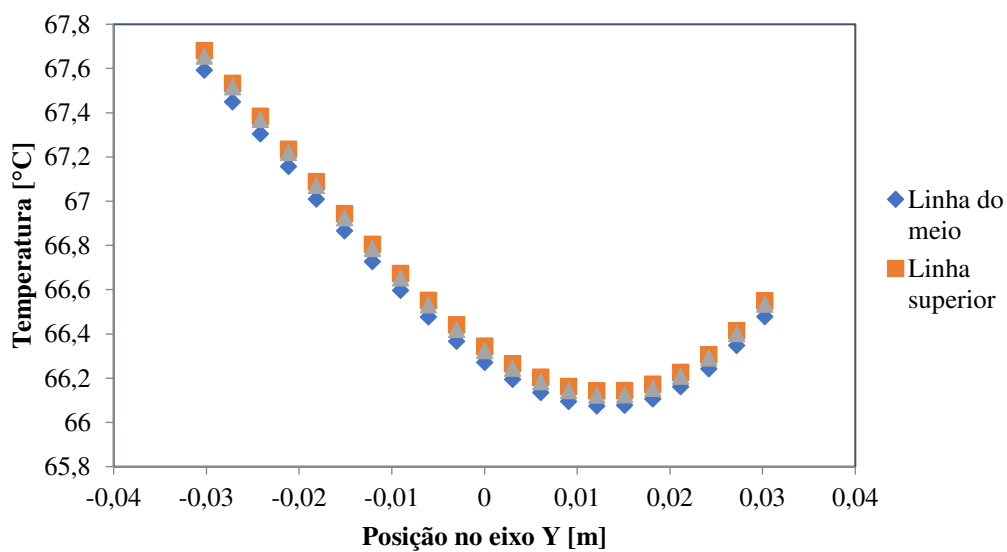
O comportamento térmico linear mencionado na Fig.4.1, para $T=110^{\circ}\text{C}$ está retratado nas 3 imagens a seguir, para $t=10$ min, $t=60$ min e $t=390$ min. Mediante os gráficos, vê-se que as temperaturas nas três linhas tendem a se sobreporem, demonstrando-se bastante semelhantes. Vê-se uma tendência de curva peculiar que se aproxima de uma parábola com concavidade para cima e ponto mínimo deslocado para a direita do bloco.

Figura 4.53: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=10$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.



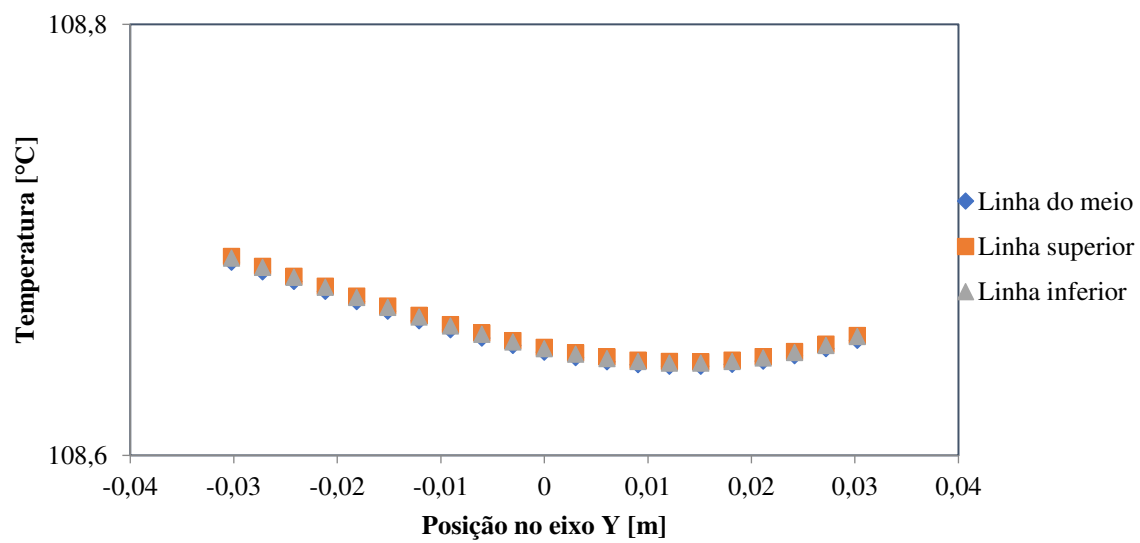
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.54: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=10$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.55: Perfis de evolução térmica no bloco cerâmicos na extensão das linhas 7, 8, 9, em $t=270$ min e $T=110^{\circ}\text{C}$.



Fonte: acervo do autor, 2023.

4.5.2 Comportamentos térmico e mássico no bloco cerâmico em três planos para $T=110^{\circ}\text{C}$

4.5.2.1 *Análise para os Planos XZ*

Nas diversas figuras, Fig. 4.86, 4.87, 4.88, 4.87, 4.88 apresentadas a seguir foi possível observar que nos planos analisados o transporte calorífico ocorre da camada superficial do bloco cerâmico para dentro no material, assim como ocorreu nas secagens a 60, 80°C. Vê-se que os gradientes térmicos para os planos apresentados na Tab. 4.12 possuem valores maiores que os das secagens a 60 e 80°C para os mesmos planos.

A camada superficial do bloco que se encontra defronte ao sentido da fase gasosa (plano XZ, em $y = -3,0225$ cm) possui um perfil térmico com valores mais elevados que a superfície oposta a essa (plano XZ, em $y = 3,0225$ cm) como é possível perceber na Fig. 4.6. O mesmo fenômeno foi observado para a mesma operação a $T=60^{\circ}\text{C}$ e $T=80^{\circ}\text{C}$.

Assim como para as temperaturas de 60 e 80°C, em todo curso da secagem analisado para as temperaturas de 110°C, vê-se que a parte de dentro do bloco continua com temperaturas menores que as constatadas nas camadas superficiais, entretanto com concentração aquosa maior que os observados nas extremidades do tijolo (Fig. 4.89, 4.90, 4.91, 4.92, 4.93).

Comparando-se os planos XZ desde a superfície negativa ($y = -3,0225$ cm) em direção à positiva ($y = 3,0225$ cm), vê-se que nos primeiros instantes o gradiente térmico tende a diminuir no sentido do eixo Y, tendo o mesmo sentido da corrente gasosa. Entretanto, quando o equilíbrio térmico e higroscópico é atingido no final, os gradientes térmicos nos planos citados se estabilizam em $\Delta T = 0,01^{\circ}\text{C}$.

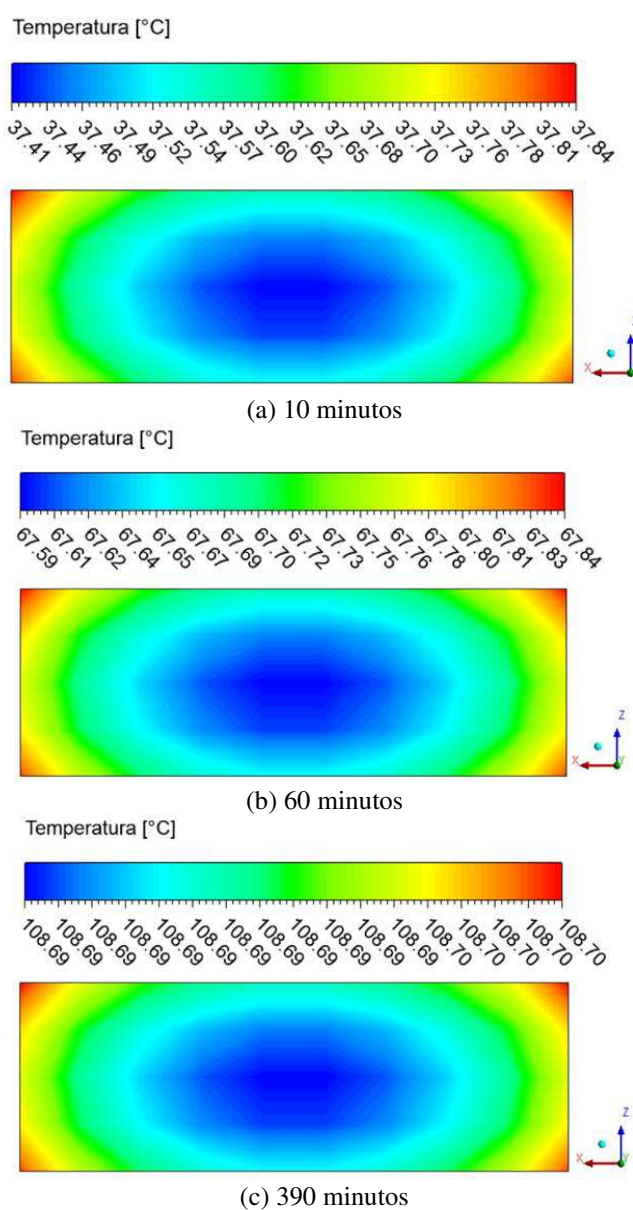
Tratando do gradiente de concentração de umidade, ao compararmos os planos XZ desde a superfície negativa ($y = -3,0225$ cm) até a camada superficial positiva ($y = 3,0225$ cm), vê-se que ele tende a ser maior ao aproximar-se das superfícies, mas tende a diminuir nos demais planos no decurso do tempo.

Tabela 4.11 - Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos XY.

Posição do Plano XY [cm]	Tempo de Secagem a 110°C					
	10 min		60 min		270 min	
	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]
y = -3,0225	0,43	0,00542	0,25	0,00237	0,01	0,00002
y = -1,51125	0,43	0,00568	0,25	0,00255	0,01	0,00001
y = 0	0,42	0,00556	0,25	0,00260	0,01	0,00002
y = 1,51125	0,40	0,00532	0,23	0,00251	0,01	0,00001
y = 3,0225	0,37	0,00472	0,21	0,00224	0,01	0,00002

Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.56: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ (y = -3,0225 cm), para a secagem a 110°C.



Fonte: acervo do autor, 2023.

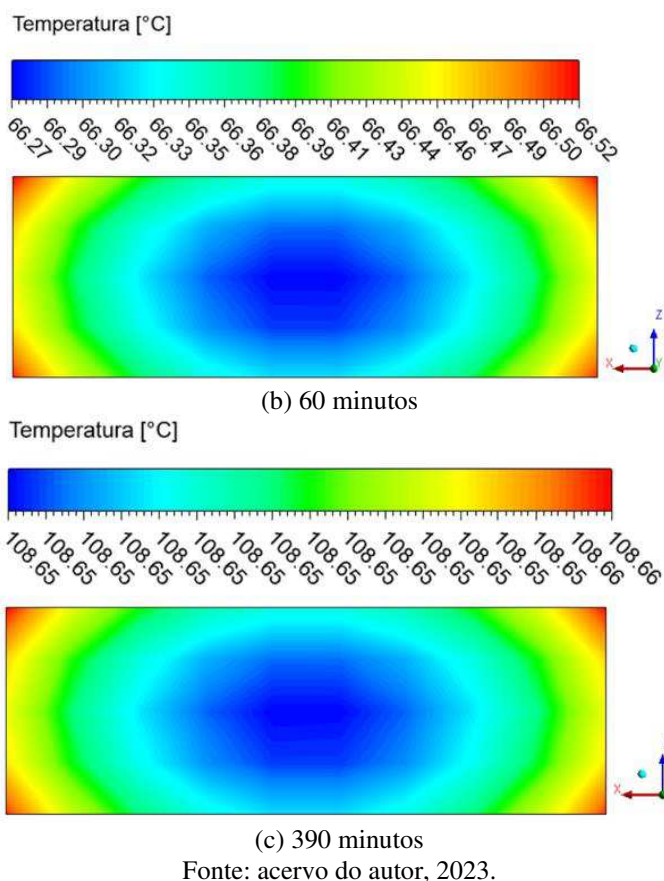
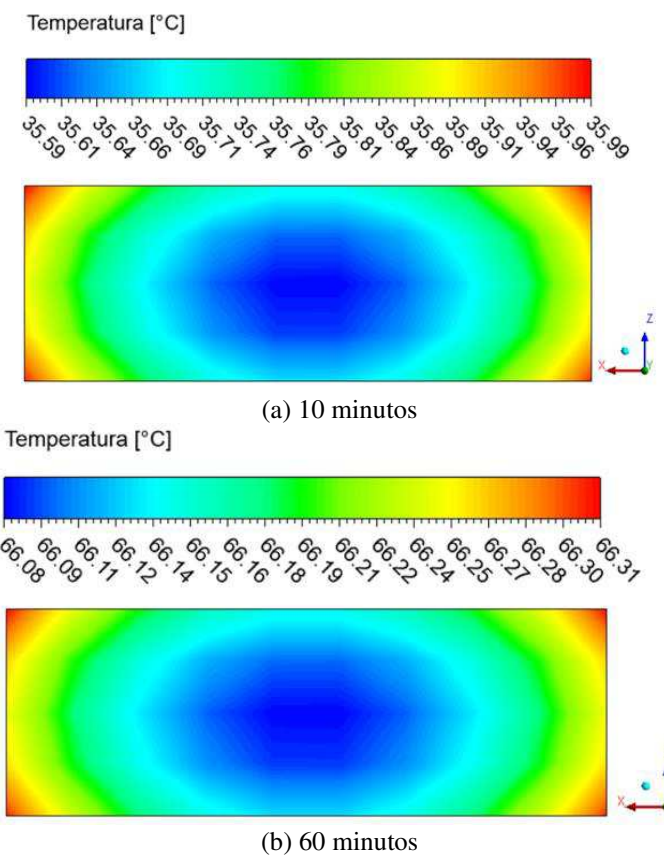
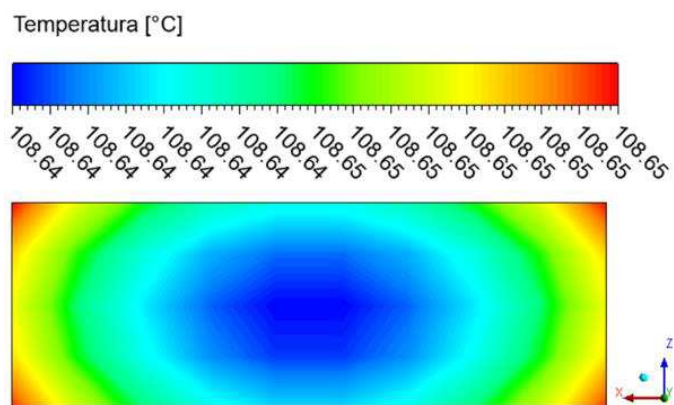


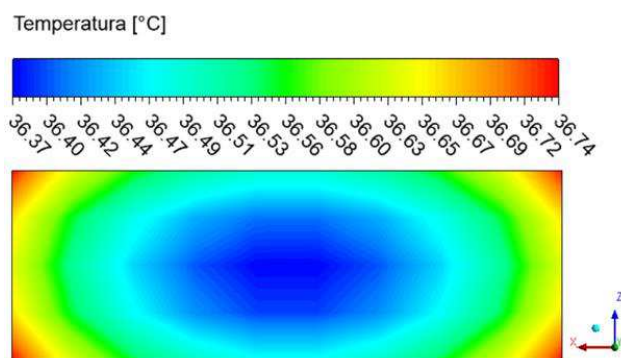
Figura 4.59: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = 1,51125$ cm), para a secagem a 110°C .



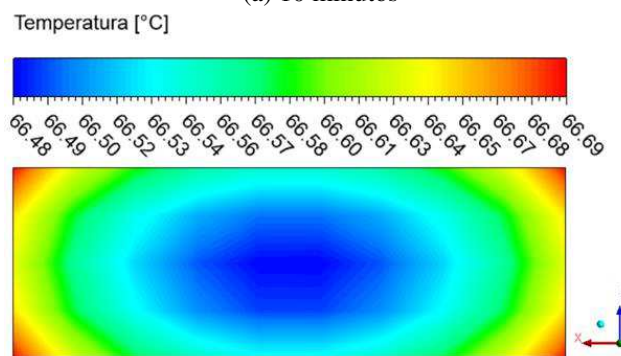


(c) 390 minutos

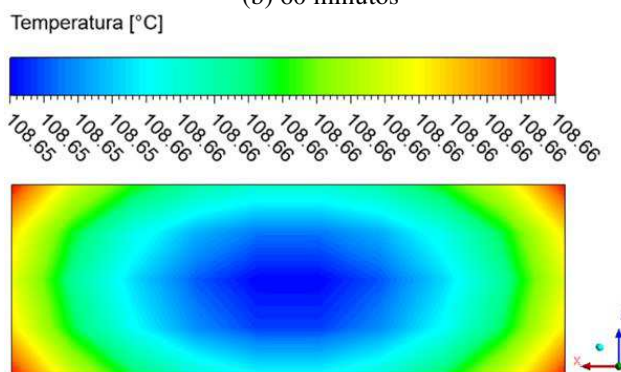
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.60: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XZ ($y = 3,0225$ cm), para a secagem a 110°C .

(a) 10 minutos



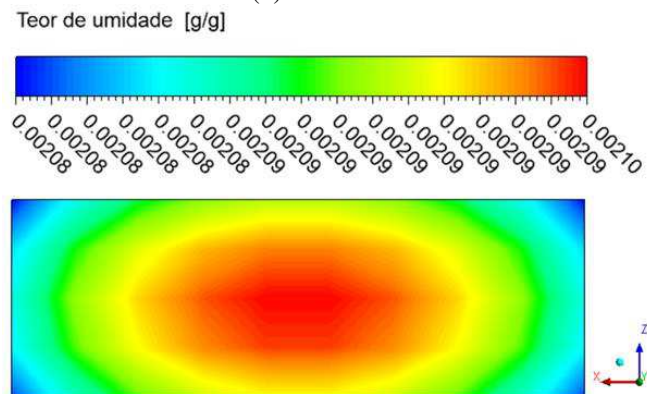
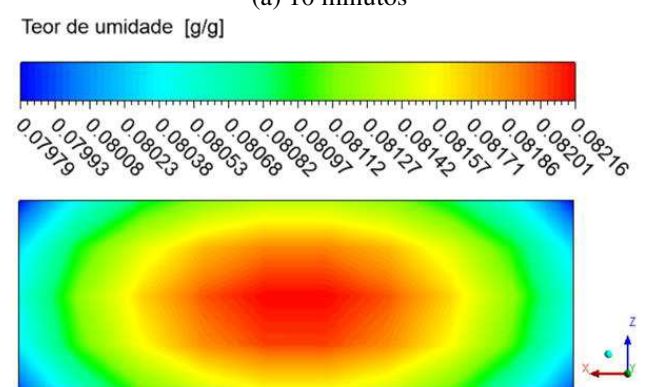
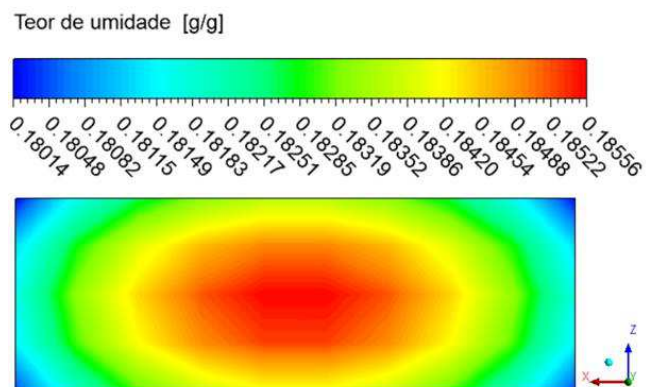
(b) 60 minutos



(c) 390 minutos

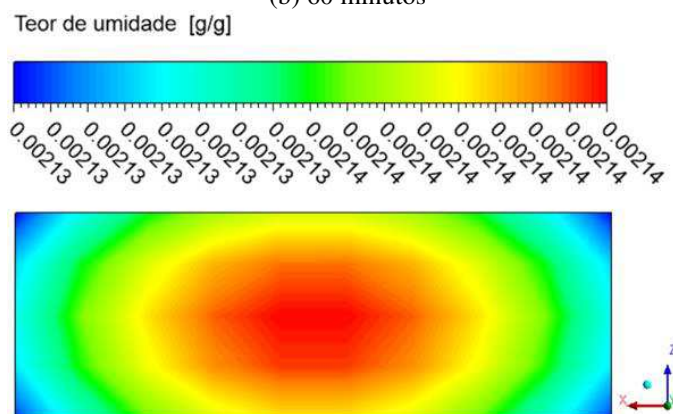
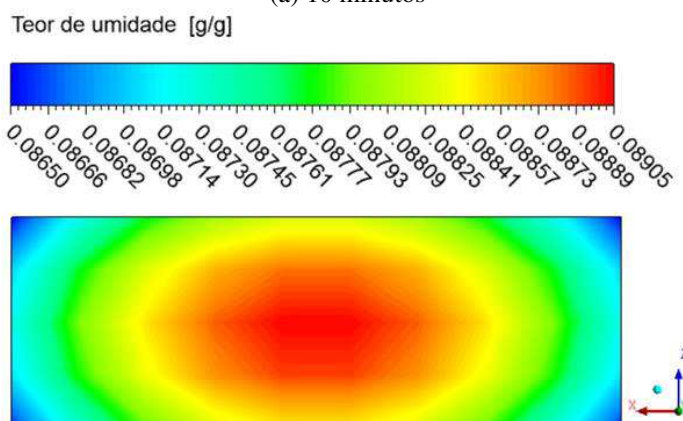
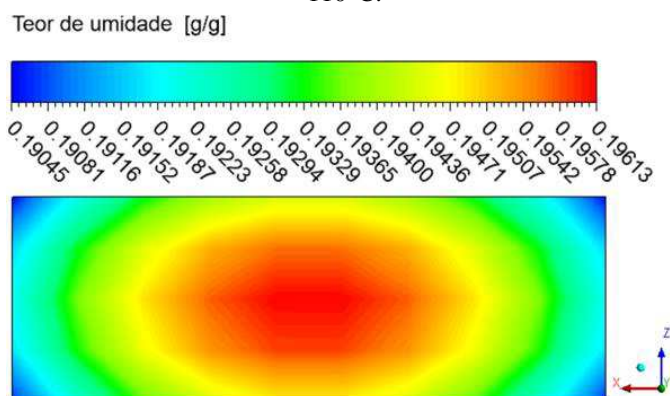
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.61: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y = -3,0225$ cm), para a secagem a 110°C



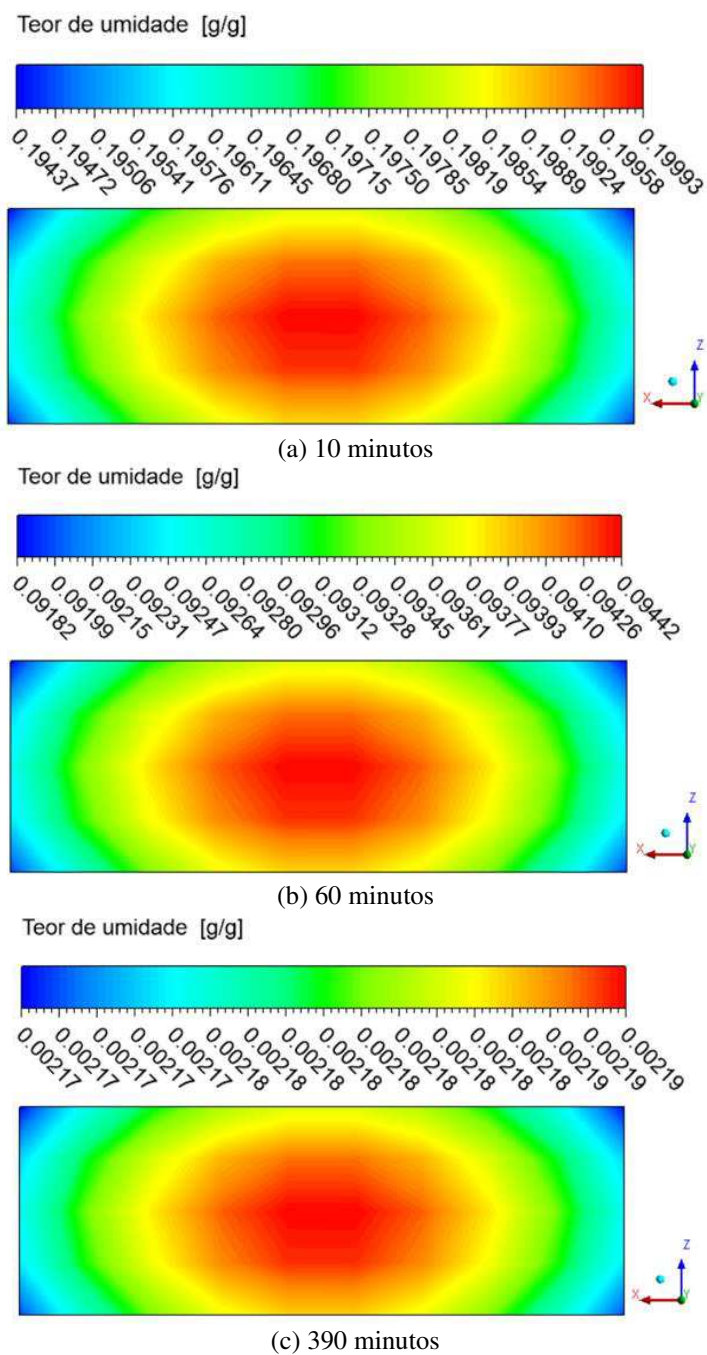
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.62: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y = -1,51125$ cm), para a secagem a 110°C .



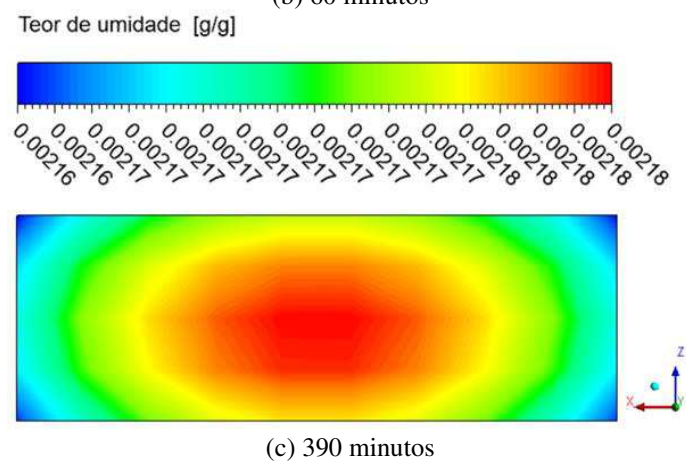
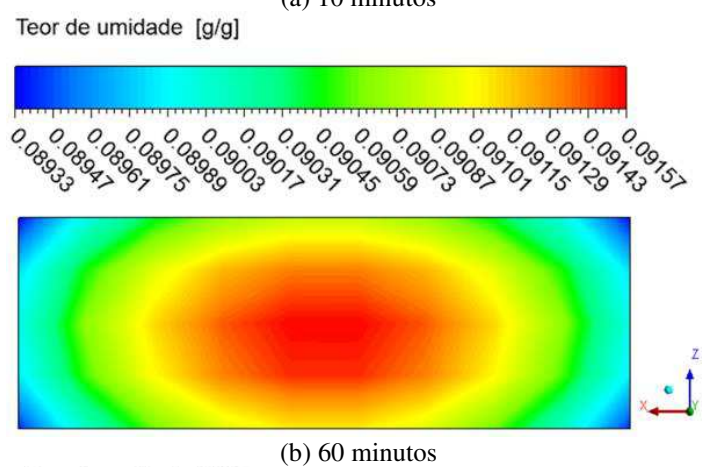
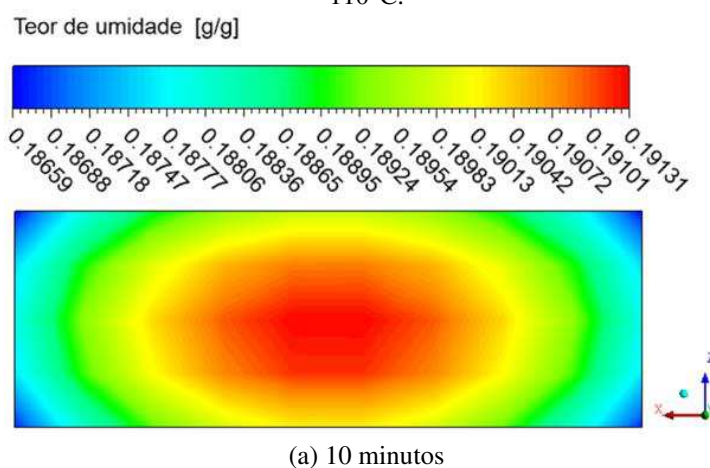
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.63: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y=0$ cm), para a secagem a 110°C .



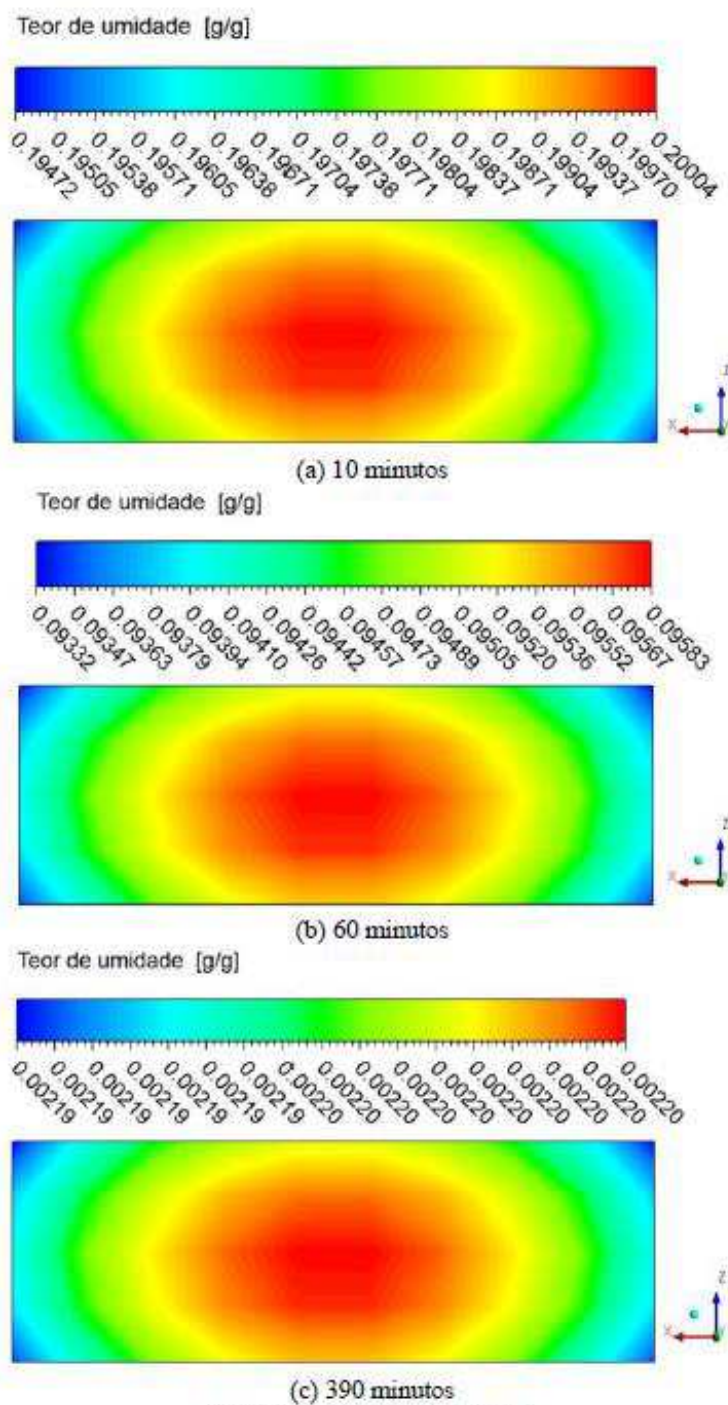
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.65: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y = 3,0225$ cm), para a secagem a 110°C .



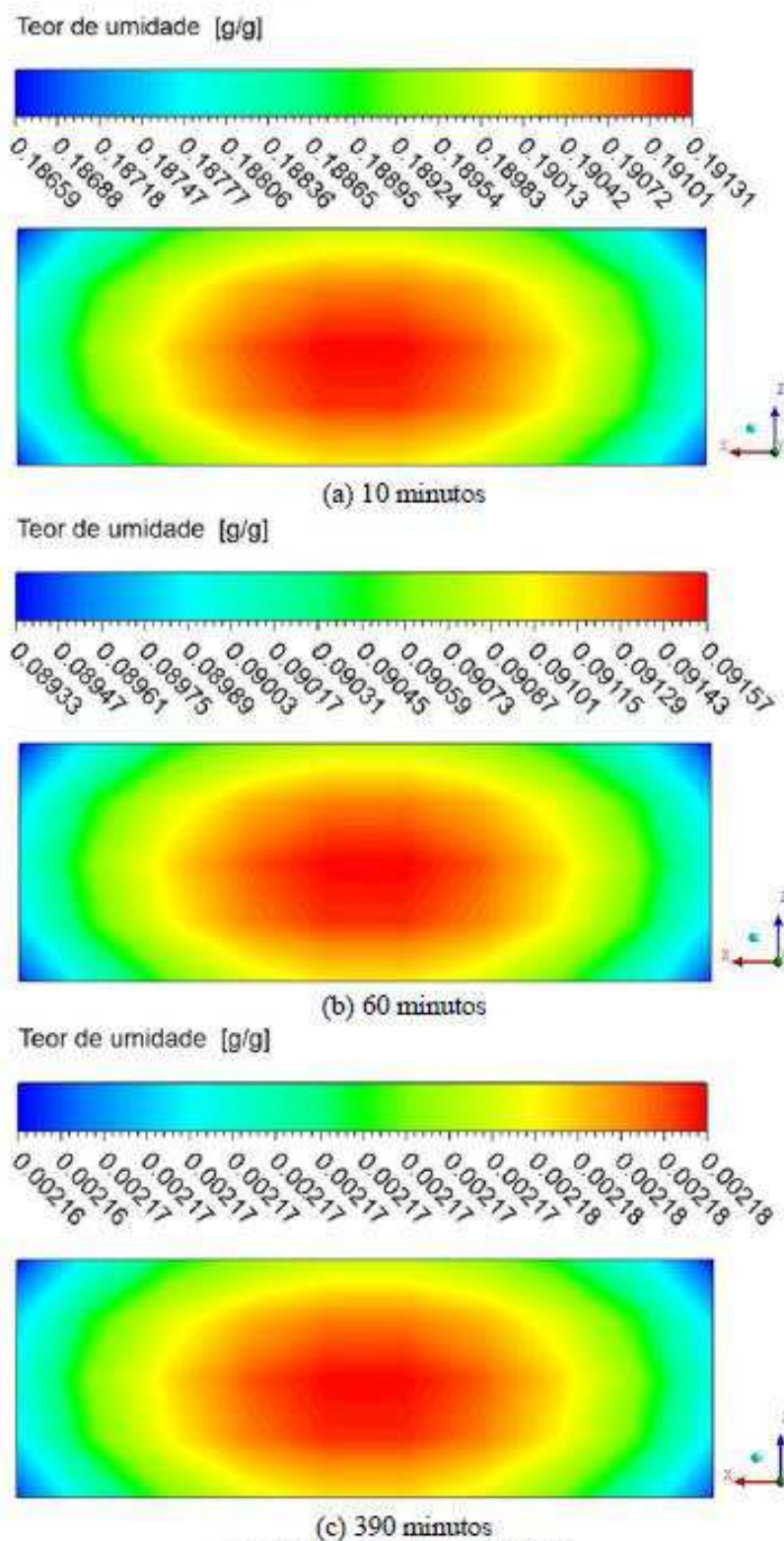
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.97 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y = 1,51125$ cm), para a secagem a 110°C .



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.98 – Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano XZ ($y = 3,0225$ cm), para a secagem a 110°C .



Fonte: Acervo do autor, 2023.

4.5.2.2 Análise para os Planos YZ

Nas Figuras 4.96; 4.97; 4.98, apresentadas a seguir foi possível observar, por meio do gradiente térmico que, do mesmo jeito que para 60°C e 80°C, o transporte calorífico ocorre da camada superficial do bloco para dentro no material. Enquanto que, por meio das figuras de umidade, 4.99; 4.100; 4.101, vê-se que o transporte mássico ocorre do interior para a camada superficial, já que as laterais do bloco possuem menores valores de concentração aquosa.

Os valores máximos dos gradientes térmicos e mássicos são de modo respectivo, $\Delta T=2,04^{\circ}\text{C}$ e $\Delta M=0,01693$, conforme Tab.4.13. Essa desumidificação a 110°C produziu um gradiente máximo de temperatura com valor maior que a 60°C e 80°C. Aumentando assim, as consequências de uma secagem desigual e por consequência dos riscos de se produzir deformações no material.

Mediante uma análise nas Fig. 4.99, 4.100, 4.101, vê-se que a camada superficial do bloco cerâmico que se encontra no lado do bloco (plano YZ, em $x = 1,0207$ cm) possui um perfil térmico levemente mais elevado que o comportamento térmico dos outros dois planos YZ ($x = 0,5135$ cm; $x = 0$ cm) que se aproximam do meio do bloco. E que esses perfis térmicos possuem valores maiores que para as operações a 60 e 80°C.

Assim, como ocorre nas secagens a 60 e 80°C, os planos YZ, tanto para temperatura quanto para umidade, apresentam seus maiores valores deslocados, de modo respectivo, para a esquerda e direita das figuras. Isso acontece por conta da assimetria do fornecimento calorífico provocado pelo maior contato com a fase gasosa que ocorre da esquerda para a direita nesses planos.

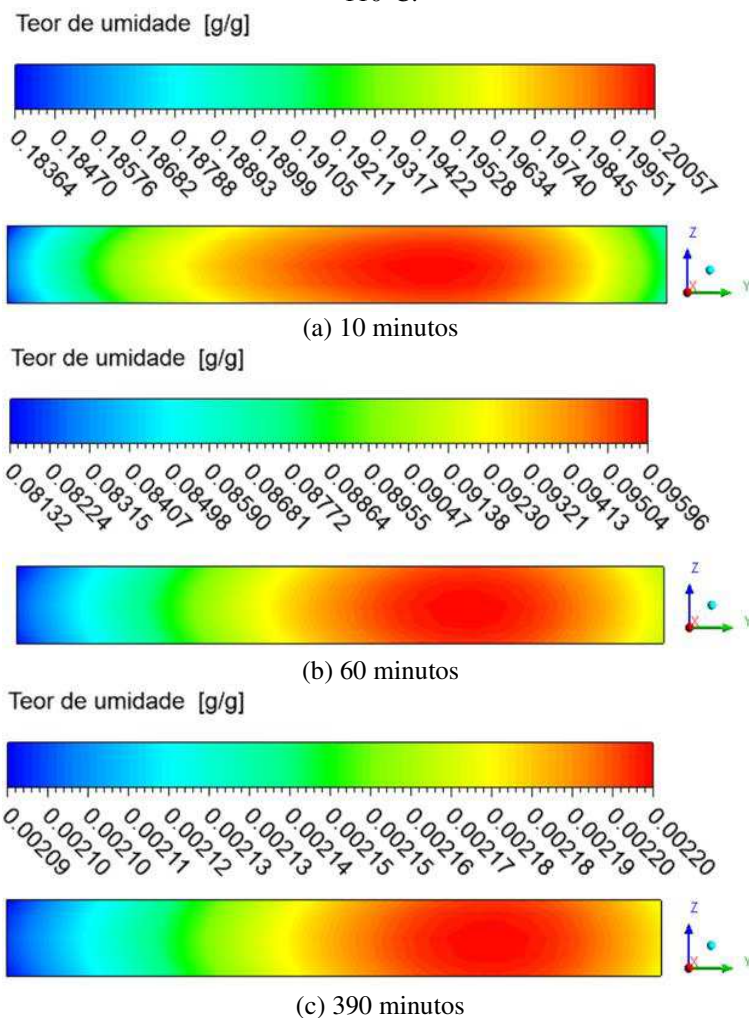
Tratando-se da umidade, vê-se que os perfis térmicos e mássicos para os três tempos analisados em $T=110^{\circ}\text{C}$, são maiores nos planos que se aproximam do meio do bloco, e menor nos locais que se aproximam das camadas superficiais. E que esses perfis de umidade possuem valores menores que os perfis das operações a 60 e 80°C.

Comparando-se os planos YZ desde a superfície lateral ($x = 1,0207$ cm) a superfície situada no meio do bloco ($x = 0$ cm), vê-se que os gradientes térmicos e mássicos diminuem tanto à medida que o tempo passa, quanto à medida que a posição do plano se aproxima da superfície. O seu menor valor para temperatura e teor de umidade é o mesmo para os três planos, acontecendo na finalização de secagem, sendo de modo respectivo $\Delta T = 0,05^{\circ}\text{C}$, e $\Delta M= 0,00011$.

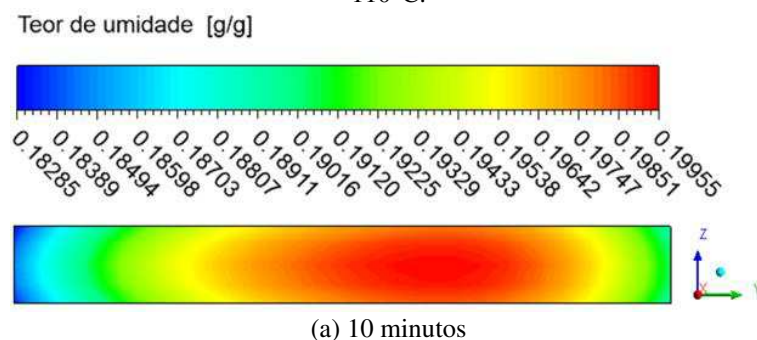
Tabela 4.12 - Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos ZY.

Posição do Plano ZY [cm]	Tempo de Secagem a 60°C					
	10 min		60 min		270 min	
	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]
X = 0,00	2,04	0,01693	1,61	0,01464	0,05	0,00011
X = 0,5135	2,03	0,01670	1,60	0,01451	0,05	0,00011
X = 1,0270	2,02	0,01644	1,59	0,01430	0,05	0,00011

Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.66: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY ($x = 0$ cm), para a secagem a 110°C.

Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.67: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 110°C.

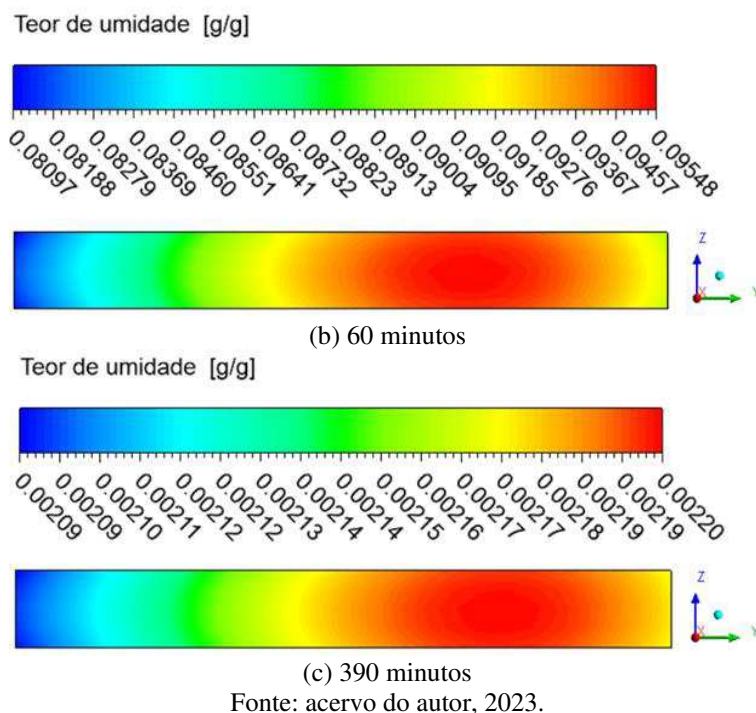


Figura 4.68: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano ZY ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 110°C .

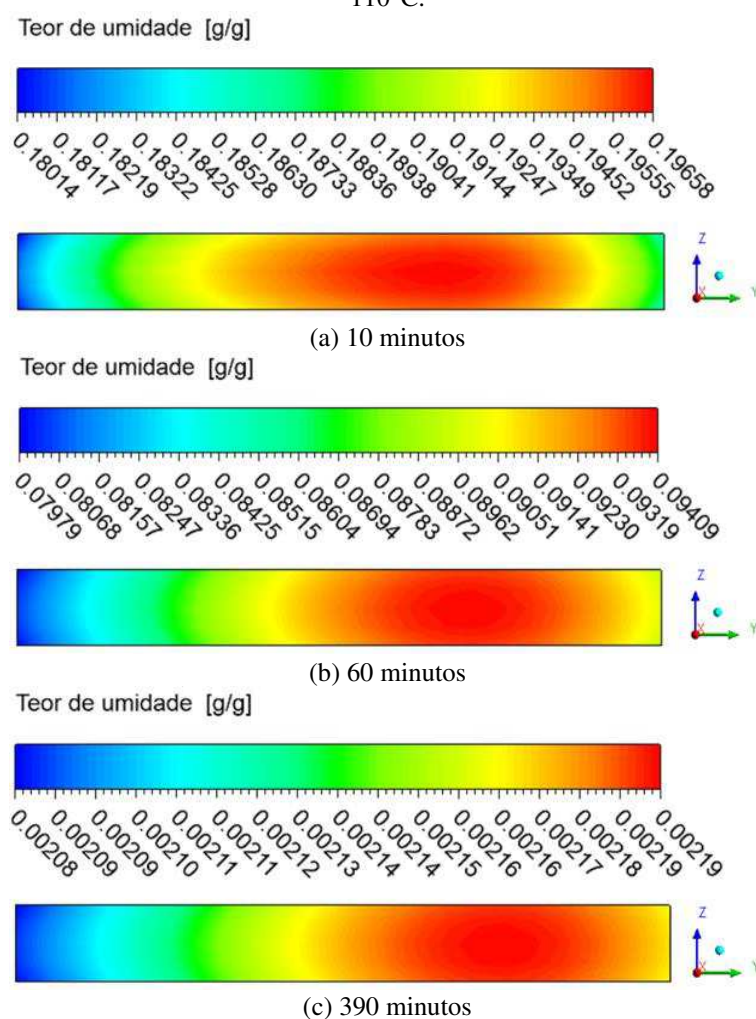


Figura 4.102: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY ($x = 0$ cm), para a secagem a 110°C .

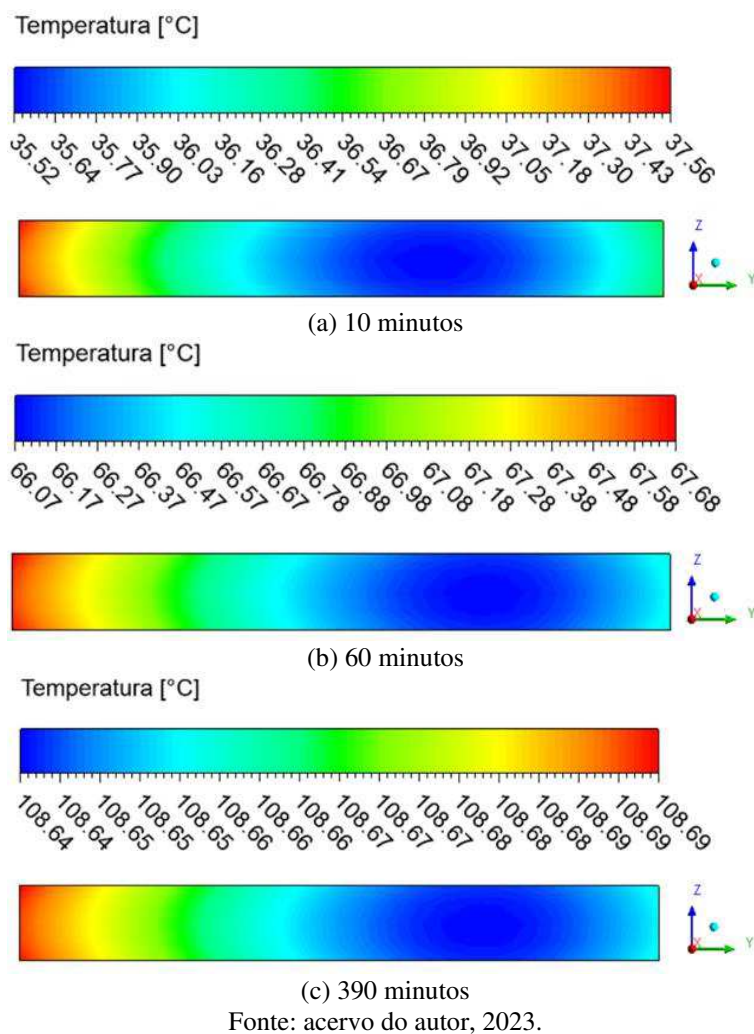
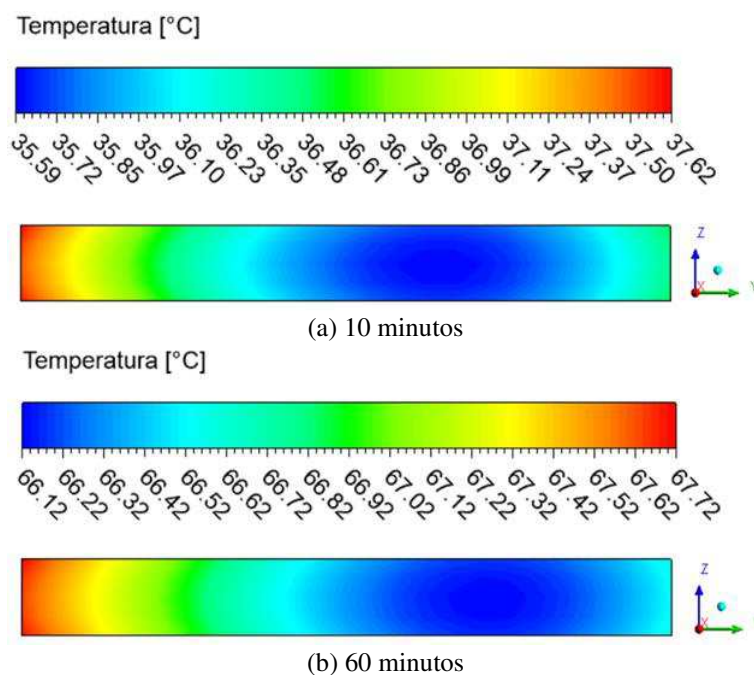


Figura 4.69: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY ($x = 0,5135$ cm), para a secagem a 110°C .



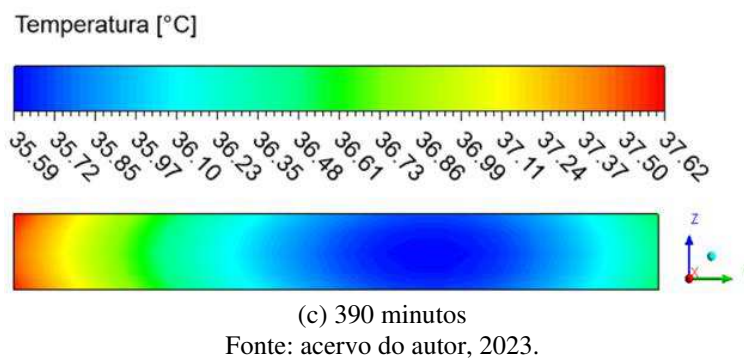
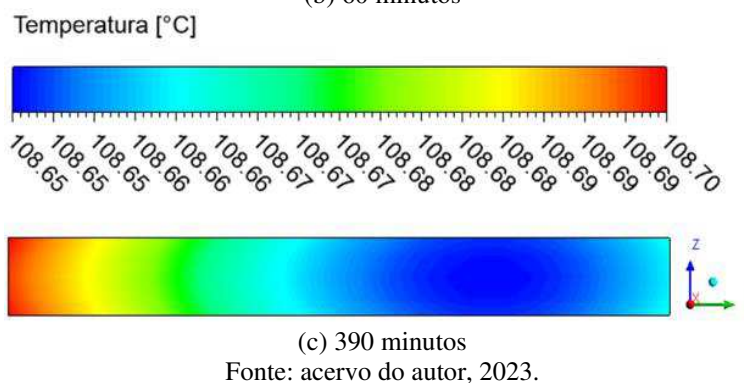
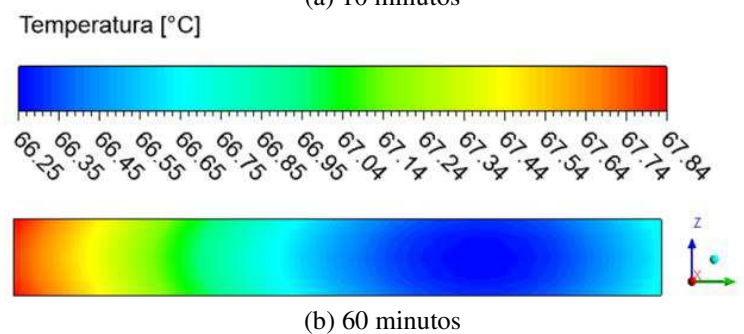
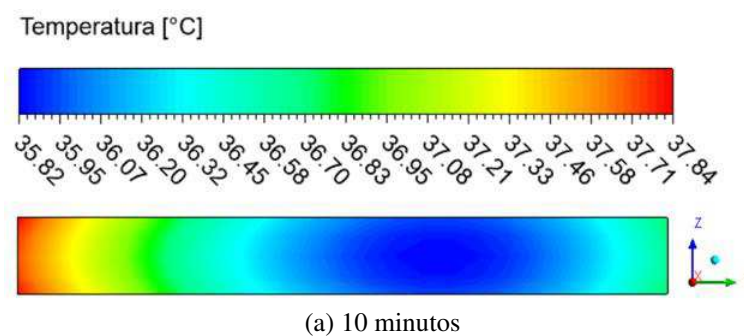


Figura 4.70: Campo de temperatura no interior tijolo, plano ZY ($x = 1,027$ cm), para a secagem a 110°C .



4.4.3.2 Análise para os Planos XY

Nas diversas figuras (Fig. 4.102, 4.103, 4.104) apresentadas a seguir foi possível observar que do mesmo jeito que para 60°C e 80°C , em 110°C o transporte convectivo ocorre da camada superficial do bloco para dentro, e o transporte mássico acontece mais intensamente próximo às superfícies.

Mediante uma análise nas figuras (Fig. 4.105, 4.106, 4.107), vê-se que a camada superficial do bloco que se encontra na parte superior (plano XY em $z = 0,706$ cm) possui um comportamento térmico levemente mais elevado que os locais que se aproximam dos meios do bloco. Sendo o inverso deste comportamento também percebido para os campos de concentração mássica para a umidade que são maiores próximos ao centro e menores próximos as superfícies.

Os planos XY apresentam para temperatura e umidade os maiores valores deslocados, respectivamente para a direita e esquerda das imagens. Isso ocorre devido a assimetria no fornecimento calorífico provocado pelo sentido da fase gasosa que ocorre da esquerda para a direita nesses planos.

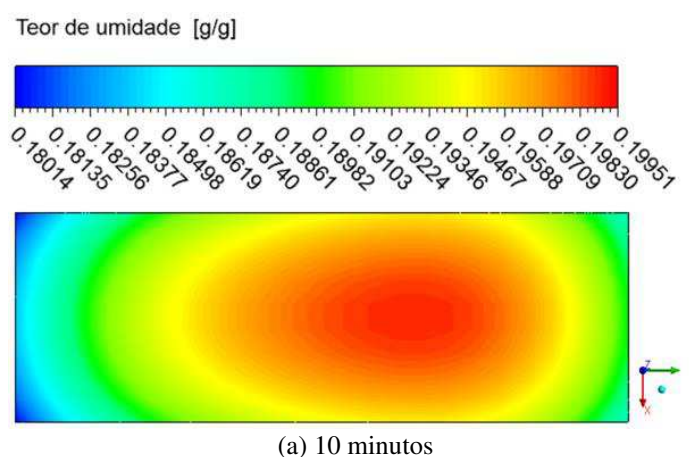
Comparando-se os planos XY desde a superfície superior ($z = 0,706$ cm) até o plano situado no meio do bloco ($z = 0,353$ cm), vê-se que o gradiente térmico e mássico diminui à medida que tempo passa e a posição dos planos se aproximam da parte de dentro do bloco.

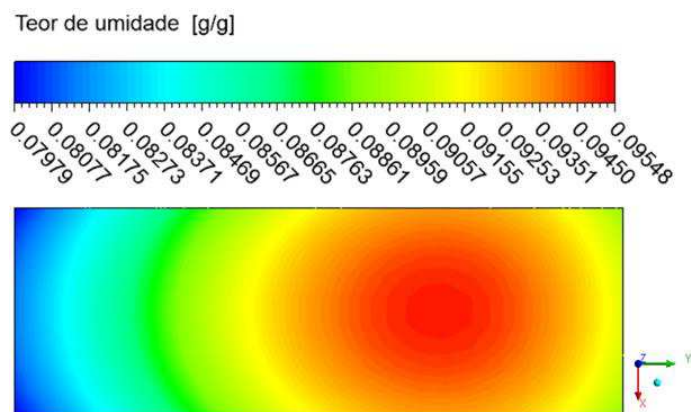
Tabela 4.13: Gradientes máximos de temperatura e teor de umidade nos planos XY.

Posição do Plano XY [cm]	Tempo de Secagem a 110°C					
	10 min		60 min		270 min	
	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]	ΔT [°C]	ΔM [g/g]
Z = 0,706	2,20	0,01937	1,70	0,01569	0,06	0,00012
Z = 0,5295	2,20	0,01886	1,70	0,01547	0,06	0,00012
Z = 0,353	2,19	0,01888	1,70	0,01550	0,06	0,00012

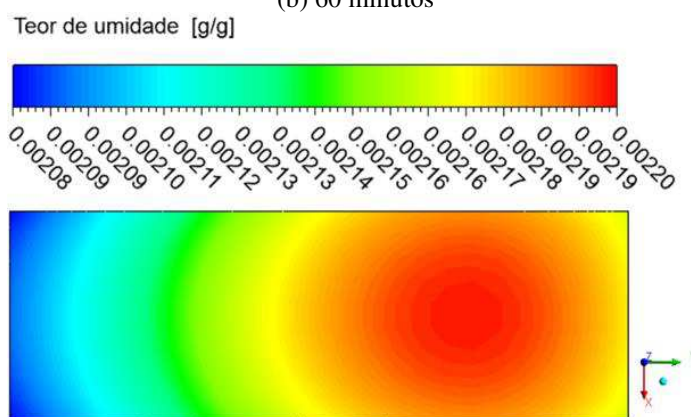
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.105: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,706$ cm), para a secagem a 110°C.





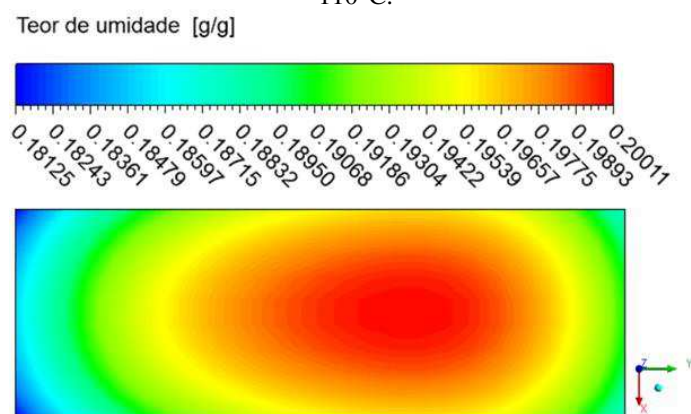
(b) 60 minutos



(c) 390 minutos

Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.71: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,5295$ cm), para a secagem a 110°C .



(a) 10 minutos

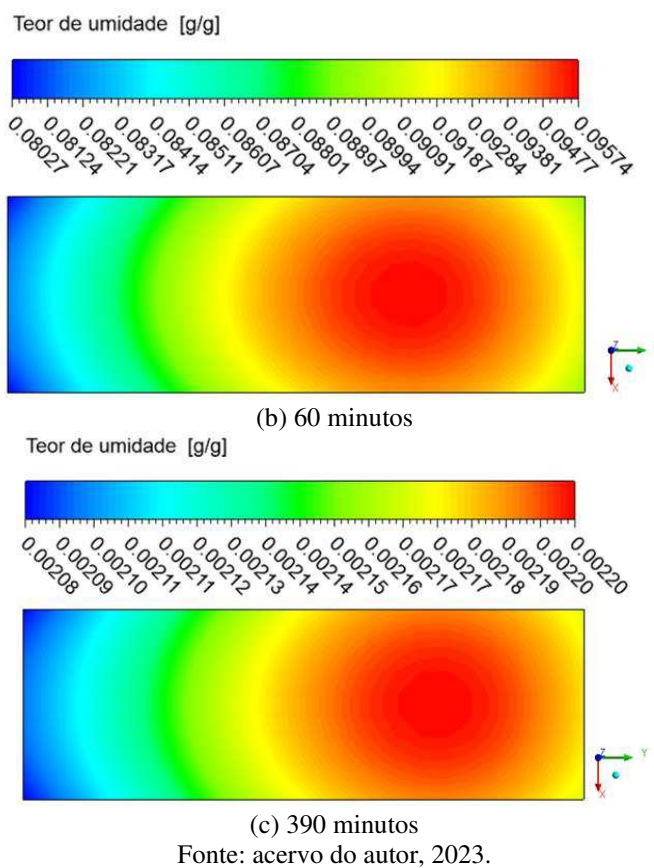
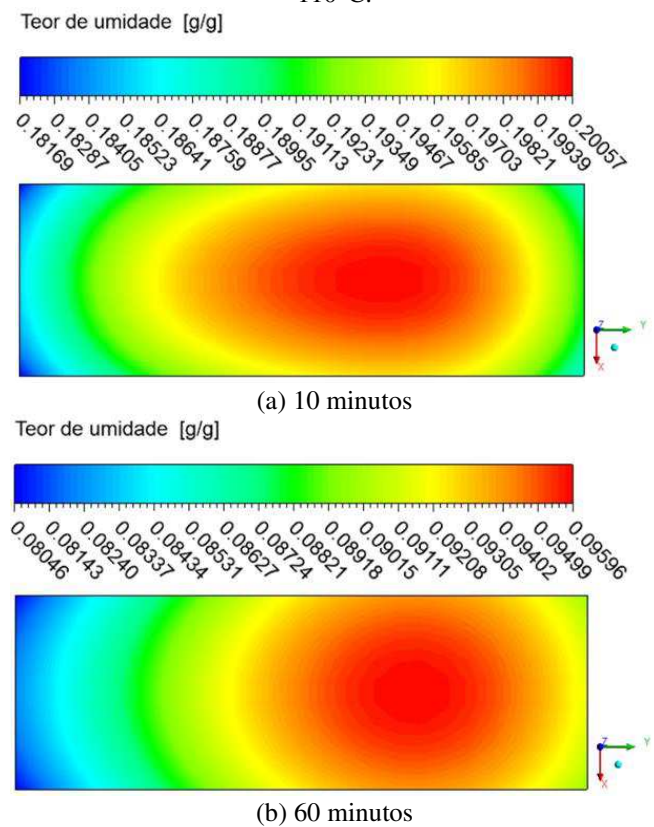
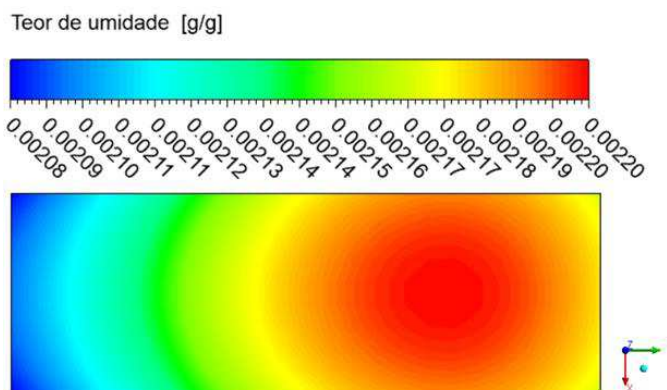


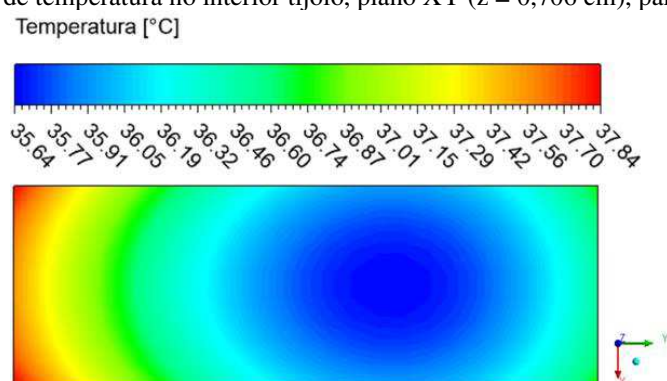
Figura 4.72: Campo do teor de umidade em base seca no tijolo, plano YX ($z = 0,353$ cm), para a secagem a 110°C .



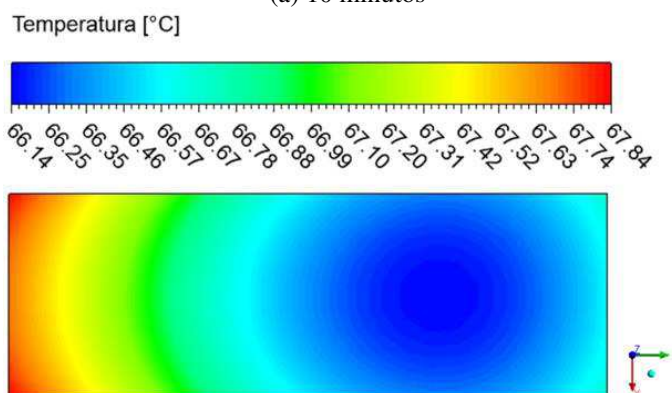


(c) 390 minutos

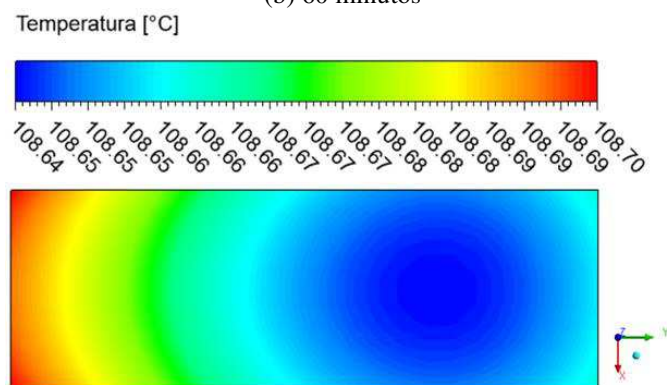
Fonte: acervo do autor, 2023.

Figura 4.73: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XY ($z = 0,706$ cm), para a secagem a 110°C .

(a) 10 minutos

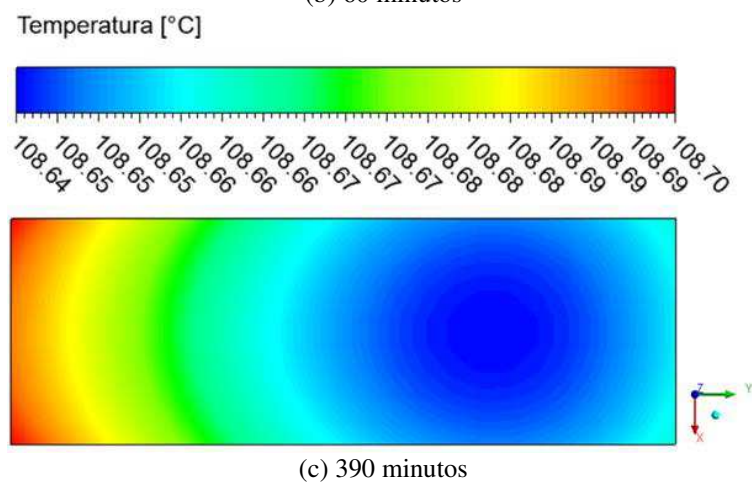
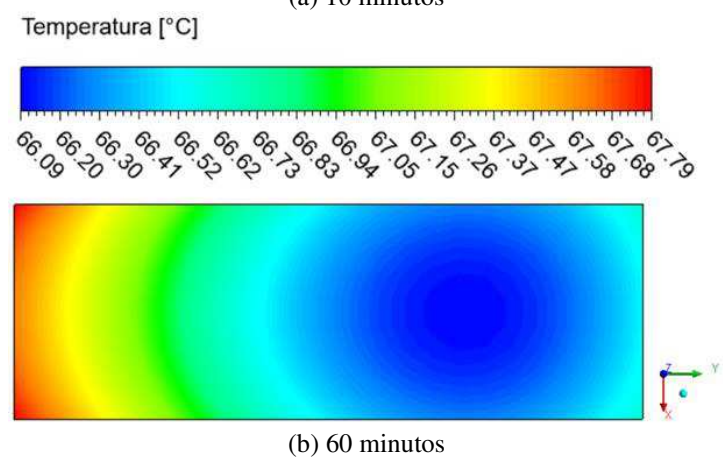
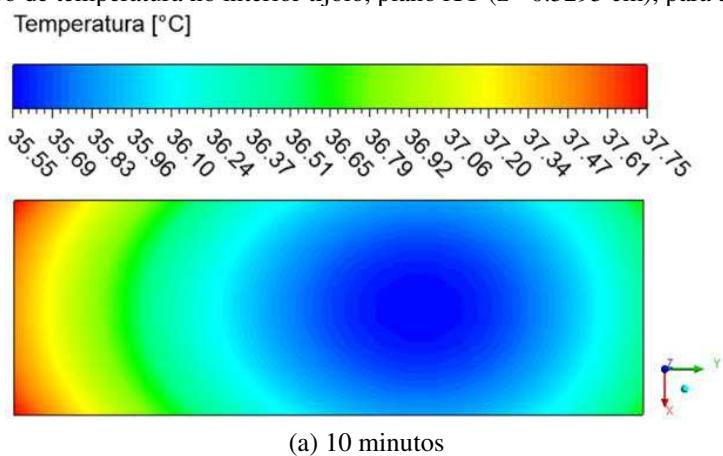


(b) 60 minutos



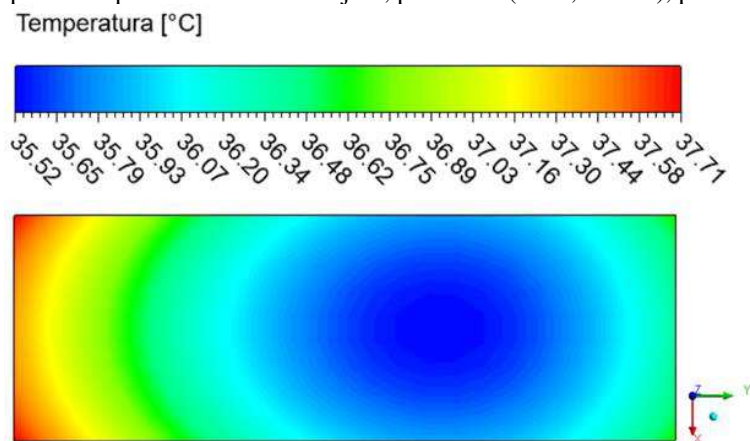
(c) 390 minutos

Fonte: acervo do autor, 2023.

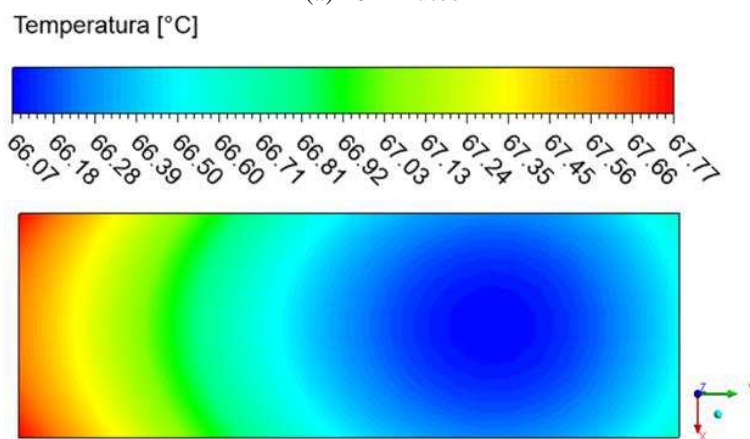
Figura 4.74: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XY ($z = 0.5295$ cm), para a secagem a 110°C .

Fonte: acervo do autor, 2023.

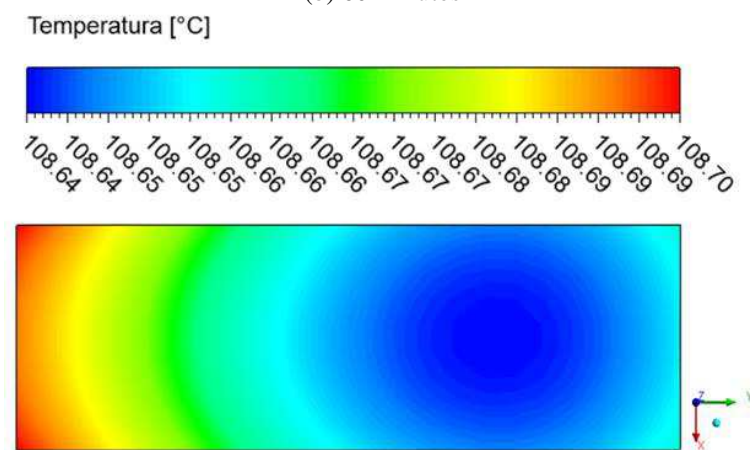
Figura 4.75: Campo de temperatura no interior tijolo, plano XY ($z = 0,353$ cm), para a secagem a 110°C .



(a) 10 minutos



(b) 60 minutos



(c) 390 minutos

Fonte: acervo do autor, 2023.

4.6 Estudo e desenvolvimento do tijolo ecológico

4.6.1 Determinação da resistência mecânica à compressão com utilização de lodo de ETA.

Para que fosse definido o tipo de lodo, úmido ou seco, a ser utilizado como aditivo na composição do bloco cerâmico, foi necessário realizar ensaios de resistência mecânica por meio da prensa compressor automática disponibilizada pelo LAME do *Campus* do Sertão da UFAL.

O valor da resistência mecânica utilizado como referência para os ensaios dos tijolos produzidos nesta pesquisa teve como referência a NBR 16814 da ABNT, na qual estipula que o mesmo deve possuir uma resistência à compressão individual mínima de 1,5 MPa.

Na primeira etapa foram realizados ensaios de compressão mecânica para definir qual o estado do lodo (úmido/seco) foi mais adequado a ser utilizado no preparo dos blocos cerâmicos da segunda etapa. Dentre o lodo úmido e o lodo seco, optou-se pela utilização do lodo seco por apresentar maior capacidade de fornecer resistência ao bloco cerâmico nos ensaios de determinação de resistência mecânica.

Na segunda etapa foram realizados ensaios de compressão mecânica para definir a concentração de lodo com relação à massa total argilosa – massa (g)/massa (g) – que pudesse além de atender a resistência requerida pela NBR 16814 da ABNT, facilitar e viabilizar o reuso deste resíduo sólido para a fins de produção de material cerâmico.

4.6.2 Dados da etapa de determinação do tipo de lodo a ser utilizado

1. No Bloco cerâmico preparado com lodo úmido, foi utilizado 100g de lodo com 68 % de umidade, ou seja, correspondia a 32g de massa de lodo seco, como apresentado na imagem abaixo.

Figura 4.111 – Ensaio de determinação de umidade de ou massa seca de amostra de lodo.



Fonte: acervo do autor, 2023.

2. No Bloco cerâmico preparado com lodo seco, foram utilizados 32.1 g de lodo triturado por um processador do tipo liquidificador, como apresentado na imagem abaixo.

Figura 4.112 – Pesagem do lodo triturado para ser misturado à massa argilosa.



Fonte: acervo do autor, 2023.

Fig. 2.15 - Ensaio de resistência, realizado no LAME (UFAL), de tijolo produzido com lodo de ETA.

Tab. 4.6.2 A tabela abaixo apresenta a resistência mecânica para cada tipo de bloco cerâmico.

Resistência mecânica à compressão	Concetração mássica de lodo em cada bloco cerâmico		
	Bloco sem lodo	Bloco com Lodo úmido	Bloco com lodo seco
	3,52 MPa	2,60 MPa	2,90 Mpa

Fonte: acervo do autor, 2023.

4.6.3 Etapa de determinação da concentração do lodo a ser utilizada no tijolo

Uma vez que, conforme ensaio supracitado, o bloco cerâmico que apresentou uma maior resistência à compressão mecânica foi o preparado com lodo seco e triturado em detrimento do lodo úmido, o mesmo foi selecionado para compor os ensaios que posteriormente definiram as resistências à compressão de acordo com o percentual de lodo seco utilizado em cada bloco. Foram utilizados os seguintes percentuais: 0,0%, 2,5 %, 5,0 % e 10 %.

A massa argilosa total utilizada para o preenchimento do molde foram 2 Kg, submetida posteriormente a uma temperatura de 110°C, a fim de se alcançar a secagem.

Como o valor da resistência mecânica utilizada como referência está prescrito na NBR 16814 para este tipo de tijolo – onde estipula que o mesmo deve possuir uma resistência à compressão individual mínima de 1,5 MPa –, mediante o ensaio utilizado, encontrou-se uma composição mássica limite de 5,0 % para a produção do bloco cerâmico. O que possibilita e viabiliza uma alternativa para a destinação do resíduo sólido produzido no tratamento de água, o que reduz o impacto ambiental causado por esse efluente.

Figura 4.113 – Ensaio de resistência, realizado no LAME (UFAL), de tijolo produzido com lodo de ETA.



Fonte: acervo do autor, 2023.

Tab. 4.6.3 A tabela abaixo apresenta a resistência mecânica para cada composição do bloco cerâmico.

Resistência mecânica à compressão	Concentração mássica de lodo em cada bloco cerâmico			
	0,0%,	2,5 %,	5,0 %	10 %.
	3,21 MPa	2,19 MPa	1,49 Mpa	1,30 Mpa

Fonte: acervo do autor, 2023.

Dessa forma, vê-se que a resistência mecânica à compressão tende a diminuir muito devido ao aumento da composição de lodo, material de origem orgânica. Fato esse que pode ser explicado da seguinte forma: uma vez que os espaços preenchidos pela matéria orgânica se tornam ociosos por conta da carbonização dela em altas temperaturas, isso passa a conferir menos resistência mecânica ao tijolo.

Toda peça produzida deve ser submetida à análise que apresentem sua resistência mecânica e a exposição de calor e umidade para que possa suportar as adversidades quando submetidas ao uso. Um bloco cerâmico de péssima qualidade se deteriora com facilidade quando submetido ao ambiente de obras, o que provoca desperdício, e contra tempo, uma vez que compromete a produtividade do serviço em questão (SINDICER, 2022).

Sabendo que as emissões de carbono emitidas no processo de fornecimento de calor tradicional são consideravelmente prejudiciais ao meio ambiente, a utilização de 5% da massa total do tijolo que no presente caso constitui-se em 2 Kg, torna-se relevante pois esse produto é fabricado em larga escala. Outra relevância é o fato de sua desumidificação ser realizada por meio de secador abastecido por energia solar, evitando o cozimento tradicional, uma vez que a resistência mínima conforme preconiza a NBR foi atingida sem a necessidade da queima.

Figura 4.114 – Blocos de tijolos com diferentes concentrações de lodo preparados para os ensaios de resistência mecânica.



Fonte: acervo do autor, 2023.

Onde a adição deste lodo visa, por meio da reutilização de resíduos do setor de saneamento, atender a uma proposta de produção com menor impacto ambiental, utilizando a

melhor temperatura para a secagem obtida nas simulações numéricas e experimentais. Ainda nesse espectro, buscou-se utilizar a elaboração de um produto que atenda a resistência

exigida pela norma brasileira NBR 16814 sem que seja necessário a etapa de queima, diminuindo significativamente a quantidade de CO₂ nesta etapa.

Conforme Wang et al. (2020), tratando de otimização energética, defende a ideia de que a secagem e queimagem são os estágios que consomem mais energia na fabricação cerâmica. Estas duas etapas chegam a consumir cerca de 54,67% da energia total do processamento.

Os três próximos gráficos, apresentados a seguir, mostram a variação dos teores de umidade adimensional e a temperatura adimensional do tijolo com 5% de composição de lodo de ETA ao longo do tempo de secagem em estufa de secagem. Ambas as variáveis obtidas foram mensuradas por meio de termômetro digital a laser e balança analítica (ambos os equipamentos foram descritos na metodologia).

Os ensaios de secagem ocorreram em três diferentes temperaturas: 60, 80 e 110°C. Essas temperaturas são as mesmas utilizadas na secagem experimental de Nascimento (2002) e na secagem numérica deste trabalho. As fôrmas utilizadas para a moldagem dos tijolos utilizados nesses ensaios, possuem suas dimensões escolhidas de forma a proporcionar as mesmas dimensões dos tijolos projetados nos casos simulados nesse trabalho, descritos na metodologia.

Figura 4.115 – Protótipo de tijolo experimental utilizado nas cinéticas de secagem apresentando fratura por conta de secagem a alta temperatura.



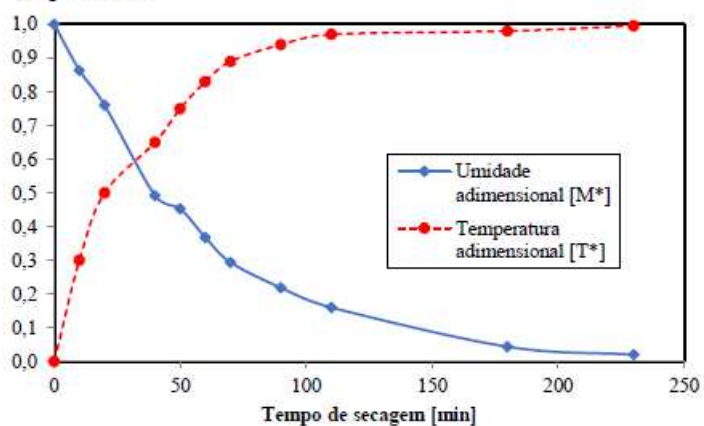
Fonte: acervo do autor, 2023.

Abaixo seguem os gráficos das curvas de cinética de secagem tanto para a umidade quanto pra temperatura realizados por meio de medição experimental em protótipos de tijolos de massa

mensurável em balança analítica. Na figura 4.115, tem-se tanto o bloco de tijolo em dimensões as usadas por Nascimento (2002), quando a fôrma utilizada para a moldagem nessas dimensões.

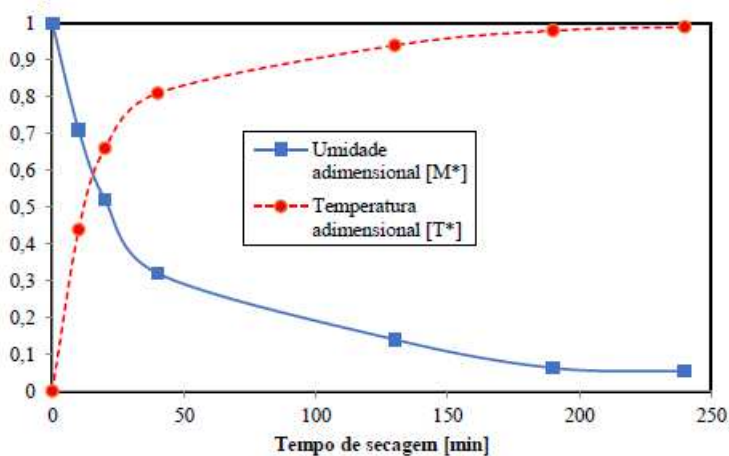
Vê-se uma concordância lógica de simetria entre as duas curvas de cinética de secagem tanto pra umidade quanto pra temperatura, já que a medida que o bloco recebe calor e aumenta sua temperatura, o mesmo perde massa aquosa diminuindo sua umidade. É possível perceber que quanto maior a temperatura de secagem, mais rapidamente as curvas se cruzam e se estabilizam em valores constantes.

Figura 4.116 – Curvas adimensionais dos teores de umidade e temperatura do tijolo para a secagem a 60°C.



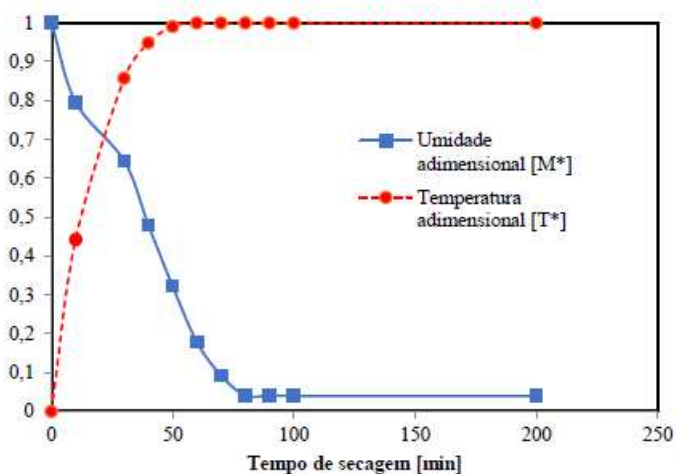
Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.117 – Curvas adimensionais dos teores de umidade e temperatura do tijolo para a secagem a 80°C. Fonte



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Figura 4.118 – Curvas adimensionais dos teores de umidade e temperatura do tijolo para a secagem a 110°C. Fonte



Fonte: Acervo do autor, 2023.

5. CONCLUSÕES

Apesar dos diversos problemas presentes na indústria cerâmica, o alto consumo energético de fontes não-renováveis ainda é o mais proeminente. Por isso, a melhoria da etapa de secagem, abordada empírica e numericamente, tornou-se o objetivo prioritário deste trabalho, uma vez que para este segmento, que ainda possui elementos de manufatura, a pouca tecnologia presente é uma herança de uma parcela significativa da indústria que recebeu/buscou pouco investimento em pesquisa.

Dessa forma, buscou-se a melhoria da secagem através não somente da demonstração da viabilidade da simulação numérica na predição de comportamentos térmicos/mássicos, mas também mediante o desenvolvimento de um tijolo ecológico que vise à eliminação do uso de fontes não-renováveis e à emissão de CO₂.

Por meio do presente modelo numérico fundamentado no método dos volumes finitos – que é utilizado na discretização das equações de transporte – e baseado na teoria da difusão líquida, foi desenvolvido um estudo termo fluidodinâmico que utilizou o software de simulação CFX na predição das condições operacionais e geométricas tanto do tijolo como do secador que podem ser alterados conforme a necessidade, visando sempre à otimização do processo.

Os resultados obtidos através do teste de dependência de malha, o qual seleciona a mais adequada dentre as disponibilizadas, mostra que existe um nível tal de refinamento, que a partir desse, torna-se pouco eficiente e inviável o custo computacional para manter os cálculos numéricos em malhas com altas quantidades de volumes de controle. Cabe ressaltar que a malha escolhida apresentou bons ajustes quanto aos valores dos coeficientes de correlação, erros médios quadráticos e variância – abordados na metodologia.

Em conformidade com o modelo desenvolvido na metodologia, validado por comparação com os resultados experimentais de Nascimento (2002), e amparado pelas Leis de Fourier e Fick, chegou-se as seguintes conclusões:

- Tornou-se evidente no tijolo que a remoção de umidade e a adição de calor ocorrem, respectivamente, em sentidos contrários durante o período de regime transiente.
- À medida que temperatura aumenta, a umidade relativa da fase gasosa no interior do secador aumenta, aumentando a velocidade da secagem.
- Conclui-se que os resultados numéricos apresentaram uma boa conformidade com os empíricos de Nascimento (2002), avaliados por meio dos gráficos de cinética de

temperatura e de umidade. Mostrou-se que a metodologia utilizada para estimar os valores dos coeficientes de transporte foi satisfatória para o presente trabalho.

- Mostrou-se que a secagem estudada se enquadra no tipo de taxa decrescente.

Em todas as temperaturas avaliadas, 60, 80 e 110°C, as secagens observadas estão submetidas a uma retração volumétrica na dimensão do sólido que ocorre devido à perda de água. Consequentemente, por esse ser um fenômeno que determina a dimensão final do sólido, o presente estudo quantificou a massa de água – via CFX – e o volume – por via experimental – que o tijolo perde durante o processo de secagem.

Por análise numérica, foi possível perceber que devido à rápida perda de água e aquecimento do tijolo no início da secagem gerou-se a presença de diferenciais térmicos e mássicos no interior do tijolo. Dessa forma, as tensões térmicas e hídricas, que ocorrem de forma mais intensa em locais próximos aos vértices e arestas se fizeram perceber por análise experimental, quando nitidamente o tijolo apresenta a presença de fissuras nessas regiões – por terem maior contato com o fluxo de ar quente.

Constatou-se que os transportes de calor e massa, ocorrem em sentidos opostos, de tal forma que é possível avaliar o comportamento simétrico da evolução das curvas adimensionais de temperatura e umidade, tanto empiricamente quanto numericamente.

Pôde-se perceber que a avaliação estatística por parâmetros como erro médio, erro relativo, variância dos quadrados dos resíduos e correlação de Pearson, tendem a confirmar o bom ajuste entre os valores numéricos e empíricos de nascimento (2002) das cinéticas de umidade para as três temperaturas avaliadas.

Por meio da determinação da difusividade da água no tijolo para as 3 temperaturas, obteve-se a solução da equação de Arrhenius, consequentemente o fator de Arrhenius, D_0 (m^2/s), e a energia de ativação E_a (kJ/mol) para os sistema tijolo-estufa modelado, possibilitando a descoberta de qualquer difusividade da água no tijolo para qualquer temperatura de secagem com possibilidade de aplicação direta em fenômenos semelhantes como umidificação, aquecimento e resfriamento de sólidos com geometria aproximada a forma paralelepípedica.

Assim, portanto, por meio da alteração das condições do meio no interior da câmara de secagem, há a possibilidade de se analisar como cada variável afeta o processo. Dessa forma, a possibilidade de conciliar a simulação da secagem do bloco cerâmico maciço com a avaliação das alterações das variáveis do meio no interior da câmara de secagem, ou seja, externo ao tijolo, possibilita a otimização nas dimensões do secador.

Na última etapa da pesquisa, mostrou-se que o resíduo pastoso de lodo de ETA constitui-se em um subproduto – rico em alumínio – eficaz na composição da massa argilosa quando utilizado a 5% na composição da massa argilosa, permitindo a produção de tijolos ecológicos com resistência à compressão mecânica mínima de 1,5 Mpa, conforme exigido pela NBR 16814. Sendo a secagem do tijolo ecológico toda realizada por meio de estufa alimentada com energia renovável proveniente de placas fotovoltaicas.

A utilização de resíduos do setor de saneamento para atender a uma proposta de tijolo ecológico, incrementando o uso de energia solar em seu processo produtivo eliminando a etapa de queima e a produção de CO₂, constituiu-se numa proposta viabilizada no sertão alagoano, de forma inédita: uma destinação limpa para o lodo de ETA na produção de um tijolo ecológico sem a etapa de queima, conciliando, assim, os interesses sustentáveis em comum dos setores industriais de saneamento e cerâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P. J. R. Materiais cerâmicos. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia de Sorocaba, Sorocaba, 2000.

ALONSO, L. F. T., Algoritmos de Seleção e Dimensionamento de Secadores. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

ALMEIDA, G. S. *et al.* Energetic and exergetic analysis of the clay bricks drying in an industrial tunnel dryer. Defect and Diffusion Forum, v. 369, n. 11, 2016.

_____. Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais.(numero de folhas e ano de entrega) Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

ARAÚJO, M. V. Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos industriais. 212 f. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

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

BAIA, K.; MÁRIO, M.; BAYLÃO, F.; SILVA, L.; FERNANDES, M.; CASTRO, J. Avaliação da Secagem de Tijolos Cerâmicos Utilizando Energia de Micro-Ondas. I Simpósio de Engenharia Metalúrgica e de Materiais Sul Fluminense, Volta Redonda – RJ, 2019.

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

_____. Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. Revista Matéria, v.14 n.4, 2009.

BORTOLI, Á. L. Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, (2000).

BAUER, L. A. F., Materiais de construção. Rio de Janeiro, LTC. 935p. 1994.

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

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de transferência de calor e massa. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BOUCKAERT, P. H. P. Utilização de energia para secagem na indústria de cerâmica vermelha. 1992. 136f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Nuclear) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1992.

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, 2002.

BRITO, M. K. T. Estudo Terórico da Transferência de calor e massa da secagem de tijolos cerâmicos com forma paralelepípedica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

BROOKER, D. B.; ARKEMA, F. W. B.; HALL, C. W., Drying and storage of grains and oilseeds. New York, AVI Book, 1992.

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

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, Março 2012.

CHEMKHI, S.; ZAGROUBA, F. Water diffusion coefficient in clay material from drying data. *Desalination*, v.185, n 1-3, p. 491-498. 2005.

Conheça nossos produtos. MINEROPAR LTDA. Disponível em: <https://mineropar.eco.br/>. Acesso em: 18 out. 2022.

CORRÊA, P. C. *et al.* Determinação do coeficiente de difusão líquido dos Grãos de feijão. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 8, n. 2, 2006.

_____. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem. *Revista Ceres*, v. 57, n. 5, 2010.

COSTA, A. R. S. Sistema de secagem solar para frutos tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

CREMASCO, M. A. Estudo sobre o escoamento gás-partículas em um reator cicônico. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

DABAIEH, M.; HEINONEN, J.; EL-MAHDY, D.; HASSAN, D. M. Comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks. *Journal of Cleaner Production*, v. 275, 2020.

DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes – A review. *Applied Energy*, v. 131, 2014.

ELIAS, X. A Fabricação de Materiais Cerâmicos. Universidade de Barcelona -Espanha, 1995, 205p.

FARIAS, S. N. Secagem de sólidos esferodais usando o método de Galerkin. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2002.

FARIAS, F. P. M. Estudo teórico da termofluidodinâmica em secadores ciclônicos. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

_____. *et al.* Influência da forma geométrica do duto de alimentação de um ciclone como secador. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of thermal Sciences and Engineering (2006).

FERNANDES, O. P.; OLIVEIRA, G. R.; COSTA, F. P.; NASCIMENTO, L. C. D.; NASCIMENTO, J. J. S. Simulação Matemática dos Gradientes Térmicos e de Umidade em Blocos Cerâmicos. 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Bento Gonçalves – RS, 2014.

FERNANDES, D. M. P. Design e tecnologia aplicados a produtos domésticos em grês cerâmico. Florianópolis, 1998. 212f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

FOUST, S. A. *et al.* Princípios das operações unitárias. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. p. 401-434.

FRICKE, J. A cerâmica. Ed. Presença Ltda, Lisboa, 152p. 1981.

GRUN, E. *et al.* Definição de Parâmetros para a Formulação de Misturas de Argilas Vermelhas. 2005. in: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, São Pedro, SP.

GUILHERME, A. Fabricação em cerâmica vermelha. MINEROPAR-Minerais do Paraná/SERT. 25p., 1998.

HANATANI, N.; ITAYA, Y. Deformation characteristic of ceramics during drying. In: Proceeding of the International Drying Symposium (IDS, 92), p. 190-199, Parte A. 1992.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, P. D. Fundamentos de transferência de calor e massa. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

Informações Técnicas - Processos de Fabricação. Associação Brasileira de Cerâmica. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso em: 17 out. 2022.

ISLAM, M. D. *et al.* Simulation of liquid diffusion-controlled drying of shrinking thin slabs subjected to multiple heat sources. *Drying Technology*, v. 21, n. 3, 2003. (está na parte dos feijões e lentilhas)

ITAYA, Y.; TANIGUCHI, HASATANI, M. A Numerical Study of Transient Deformation and Stress Behavior of a Clay Slab During Drying. *Drying Technology*, Vol 15, no. 1, pp 1-21. (1997).

KETELAARS, A.A.J.; LAUF, O.; COUMANS, W.J.; KERKHOF, P.J.A.M. Determination of Diffusion Coefficient from Experimental Moisture Concentration Profiles in Clay. *Drying* 1992, Part A, pp. 345-352.

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

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

KNARUD, J. I.; GEVING, S.; KVANDE, T. Moisture performance of interior insulated brick wall segments subjected to wetting and drying – A laboratory investigation. *Building and Environment*, 2020.

KRAUSE, E. Manuels de technologie de ceramique industrielle lê sechage en ceramic priciples e techniques. Paris: Septima, 1977. pp 11-147.

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

LIMA, A. G. B. Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UNICAMP, São Paulo. 1999. 244 p.

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.

LUCCHI, M.; SUZZI, N.; LORENZINI, M. Dynamic model for convective heating of a wet brick during energy characterisation of domestic electric ovens. *Applied Thermal Engineering*, v. 161, 2019.

MAFRA, A. T. Proposta de indicadores para a indústria de cerâmica vermelha. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis. Disponível em: . 1999.

Materiais cerâmicos e seus usos. Mecânica Industrial. Disponível em: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/materiais-ceramicos-e-seus-usos/>. Acesso em: 17 out. 2022.

MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit operations of chemical engineering. 7. ed. Nova York: McGraw-Hill Science, 2004.

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, 1999.

MEDEIROS, B.L. Secagem de argilas com ar quente produzido por radiação solar. 1977. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1977.

MOTTA, J. F. M. Estudo da tipologia e caracterização geológicotecnológica de depósitos de argilas plásticas brasileiras e o desenvolvimento de massas para cerâmica branca. 2007. Processo Fapesp 03/13762-4, p. 190. 2007.

MURUGESAN, K.; SURESH, H. N.; SEETHARAMU, K. N.; NARAYANA, P. A. A. and SUNDARARAJAN, T. S. theoretical model of brick drying as a conjugate problem. International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 44, n. 21, p. 4075-4086. 2001.

NASCIMENTO, J. J. S. Fênomenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.

_____. *et al.* Simultaneous heat and moisture transfer and shrinkage during drying of ceramic materials. 2004. Drying – Proceedings of the 14th International Drying Symposium, 2004.

_____.; LIMA, A. G. B. Experimental drying of ceramics bricks including shrinkage. Defect and Diffusion Forum, v. 365, 2015.

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

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Agrimensura) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas (2007).

PAULETTI, M. C. Modelo para introdução de nova tecnologia em agrupamentos de micro e pequenas empresas: estudo do caso das indústrias de cerâmica vermelha no Vale do Rio Tijucas. Mestrado (Dissertação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2001.

PEARSON, H. *et al.* Modelling and optimisation of ceramic and wood dewatering using supercritical CO₂. The Journal of Supercritical Fluids, v. 146, 2019.

Pesquisar Teste aponta qualidade ruim de tijolo. SINDICATO DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA DA PARAÍBA – SINDICER. Disponível em: <http://www.sindicerp.com.br/post/121035387227/pesquisar-teste-aponta-qualidade-ruim-de-tijolo>. Acesso em: 17 out. 2022.

REEDs, J. S. Drying. ASM International Handbook Committee. 1991, p. 131-134.

RODRIGUEZ-RAMIREZ, J. *et al.* Diffusion of moisture in drying of sugar cane fibers and bundles. Drying Technology, v. 18, n. 4-5, 2000.

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

SANTOS, P.S. Tecnologia de Argilas . 2. ed., v 2. São Paulo, Edgard Blucher/EDUSP, 1989.

SHOKOUMAND, H. *et al.*. Performance optimization of a brick dryer using porous simulation approach. Drying Technology: An International Journal, v. 29, n. 3, p. 360-370, 2011.

SILVA, J. P. P. A. Secador ciclônico: Modelagem e simulação via CFX. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SILVA, W. P. Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SILVA, J. B. *et al.*. Heat and mass diffusion including shrinkage and hygrothermal stress during drying of holed ceramics bricks. Defect and Diffusion Forum, v. 312-315, 2011.

SILVA, C. M. D. P. *et al.*. Effective diffusivity and convective mass transfer coefficient during the drying of bananas. Engenharia Agrícola, v.32, n.2, p.342-353, 2012.

SILVA, W. P. *et al.*. Drying of clay slabs: experimental determination and prediction by two-dimensional diffusion models. Ceramics International, v. 39, n. 7, p. 7911–7919, 2013.

_____ *et al.*... 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, M. A., Estudo da secagem em ciclone. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

SOARES, J. M. D. *et al.* Panorama Sócio-Econômico das Indústrias de Cerâmica Vermelha da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, Cerâmica Industrial. 2004.

SOUZA, J. A. R. Secagem de Sólidos via ciclones: modelagem e simulação. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. Liquid diffusivity of rough rice components. Transactions fo the ASAE, v.23, n° 3, pp. 767-774, 1980.

SU, Shun-Lung. Modeling of multi-phase moisture transfer and induced stress in drying clay bricks, Applied Clay Science, v. 12, pp 189-207, 1997.

TAVARES, D. P. S. Escoamento trifásico não-Isotérmico em oleodutos horizontais com vazamento: Modelagem e simulação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

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.

_____; 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. (no texto tem vander zen 1996 e 1997)

Villar, G. C. Estudo do desempenho de um secador convectivo de bandejas para a secagem de banana: análise da influência das variáveis operacionais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

WANG, Y. *et al.*. Comparative life cycle assessment of different fuel scenarios and milling technologies for ceramic tile production: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 273, 2020.

WITTWER, H.; FARIA, R. W. Projeto de conservação de energia nas pequenas e médias indústrias do Estado do Rio de Janeiro: setor de cerâmica vermelha. Relatório Final. Rio de Janeiro: 1997.

ZHANG, M. *et al.*. Effects of dehumidification drying parameters on physical and chemical properties of biomass brick. *Construction and Building Materials*, v. 215, p. 696–708, 2019.

APÊNDICE

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

1. Secagem a 60°C

Dados:

- Temperatura do ar: 60°C (Nascimento, 2002)
- Umidade relativa do ar: $U_{rel} = 10,1\%$ (Nascimento, 2002)
- Pressão de vapor saturado a 60°C: $p_v^{Sat} = 0,1994 \text{ bar}$ (Shapiro et al., 2005)
- Massa específica do ar seco a 60°C: $\rho_{ar\ seco} = 1,060 \text{ kg/m}^3$ (Shapiro et al., 2005)

Condições de contorno

- Pressão de vapor:

$$p_{vap} = U_{rel} p_v^{sat} = 0,101 \times 0,1994 \text{ bar} = 0,0201 \text{ bar}$$

- Razão de mistura (umidade absoluta)

$$\omega = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0,622 \frac{0,0201 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,0201 \text{ bar}} = 0,0126 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}}$$

- Vazão mássica de ar seco na entrada da estufa

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_{ar\ seco} U_{ar\ seco} A_{estufa} = 1,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,0144 \text{ m}^2 = 1,52579 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

- Vazão mássica de água

$$\dot{m}_{\text{água}} = \omega \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0126 \times 1,526 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,01925 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Condições iniciais

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_{ar\ seco} V_{ar\ seco} = 1,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,00863123 \text{ m}^3 = 0,0091 \text{ kg}$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{\text{água}} = \omega m_{ar\ seco} = 0,0126 \times 0,0091 \text{ kg} = 0,11536 \text{ g}$$

2. Secagem a 80°C

Dados:

- Temperatura do ar: 80°C (Nascimento, 2002)
- Umidade relativa do ar: $U_{rel} = 5\%$ (Nascimento, 2002)
- Pressão de vapor saturado a 80°C: $p_v^{Sat} = 0,4739 \text{ bar}$ (Shapiro et al., 2005)

- Massa específica do ar seco a 80°C: $\rho_{ar\ seco} = 1,0\text{ kg/m}^3$ (Shapiro et al., 2005)

Condições de contorno

- Pressão de vapor:

$$p_{vap} = U_{rel}p_v^{sat} = 0,05 \times 0,4739\text{bar} = 0,0237\text{bar}$$

- Razão de mistura (umidade absoluta)

$$\omega = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0,622 \frac{0,0237\text{bar}}{1,01325\text{bar} - 0,0237\text{bar}} = 0,0149 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}}$$

- Vazão mássica de ar seco na entrada da estufa

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_{ar\ seco} U_{ar\ seco} A_{estufa} = 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,0144\text{m}^2 = 1,43938 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

- Vazão mássica de água

$$\dot{m}_{\text{água}} = \omega \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0149 \times 1,43938 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,02144 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Condições iniciais

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_{ar\ seco} V_{ar\ seco} = 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,00863123\text{m}^3 = 0,0086\text{kg}$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{\text{água}} = \omega m_{ar\ seco} = 0,0149 \times 0,0086\text{kg} = 0,1285\text{g}$$

3. Secagem a 110°C

Dados:

- Temperatura do ar: 110°C (Nascimento, 2002)
- Umidade relativa do ar: $U_{rel} = 2,3\%$ (Nascimento, 2002)
- Pressão de vapor saturado a 110°C: $p_v^{sat} = 1,433\text{ bar}$ (Shapiro et al., 2005)
- Massa específica do ar seco a 110°C: $\rho_{ar\ seco} = 0,921\text{ kg/m}^3$ (Shapiro et al., 2005)

Condições de contorno

- Pressão de vapor:

$$p_{vap} = U_{rel}p_v^{sat} = 0,023 \times 1,433\text{bar} = 0,033\text{bar}$$

- Razão de mistura (umidade absoluta)

$$\omega = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0,622 \frac{0,033\text{bar}}{1,01325\text{bar} - 0,033\text{bar}} = 0,0209 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}}$$

- Vazão mássica de ar seco na entrada da estufa

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_{ar\ seco} U_{ar\ seco} A_{estufa} = 0,921 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,001 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,0144\text{m}^2 = 0,01327 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

- Vazão mássica de água

$$\dot{m}_{\text{água}} = \omega \dot{m}_{\text{ar seco}} = 0,0209 \times 1,32668 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,02774 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Condições iniciais

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{\text{ar seco}} = \rho_{\text{ar seco}} V_{\text{ar seco}} = 0,921 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,00863123 \text{m}^3 = 0,0080 \text{kg}$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{\text{água}} = \omega m_{\text{ar seco}} = 0,0209 \times 0,0080 \text{kg} = 0,16630 \text{g}$$

APÊNDICE B – Dados referentes a massa de água do tijolo utilizados no teste de malha.

Evolução temporal da massa de água média no interior do tijolo para a secagem a 60°C

t [min]	m_{água} [g]					
	Experimental	Malha 01	Malha 02	Malha 03	Malha 04	Malha 05
0	1,73	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
2	1,65	1,70	1,70	1,69	1,68	1,67
4	1,57	1,66	1,65	1,64	1,62	1,61
6	1,50	1,61	1,60	1,58	1,56	1,54
8	1,42	1,57	1,55	1,53	1,51	1,49
10	1,34	1,53	1,51	1,49	1,46	1,44
20	1,08	1,36	1,31	1,28	1,25	1,22
30	0,86	1,21	1,16	1,12	1,09	1,06
60	0,55	0,87	0,81	0,77	0,74	0,71
90	0,34	0,64	0,58	0,55	0,52	0,49
120	0,25	0,47	0,42	0,39	0,36	0,34
200	0,14	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14
230	0,12	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10
270	0,10	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07

APÊNDICE C – Ajustes da difusividade mássica da água no interior do tijolo.

Evolução temporal da massa de água média no interior do tijolo variando-se a difusividade mássica para a secagem a 60°C.

D_{tijolo} [m²/s]	2,00x10⁻⁹	2,33x10⁻⁹	8,00x10⁻⁹	1,00x10⁻⁸	1,40x10⁻⁸	2,33x10⁻⁸
t [min]	Massa de água [g]					
0	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
2	1,69	1,68	1,67	1,66	1,66	1,66
4	1,63	1,62	1,60	1,59	1,59	1,59
6	1,57	1,56	1,54	1,52	1,52	1,53
8	1,52	1,51	1,48	1,46	1,46	1,47
10	1,47	1,46	1,43	1,41	1,41	1,41
20	1,27	1,25	1,21	1,17	1,16	1,16
30	1,11	1,09	1,03	0,98	0,97	0,96
60	0,77	0,74	0,64	0,59	0,56	0,54
90	0,54	0,52	0,41	0,36	0,33	0,31
120	0,39	0,36	0,26	0,22	0,20	0,19
200	0,17	0,15	0,09	0,07	0,06	0,06
230	0,13	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04
270	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03

Difusividades mássicas testadas para a secagem a 80°C.

D_{tijolo} [m ² /s]	$1,3 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-8}$	$8,0 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-7}$
t [min]	Massa de água [g]				
0	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71
2	2,58	2,59	2,59	2,60	2,60
4	2,47	2,48	2,49	2,50	2,50
6	2,38	2,39	2,40	2,40	2,41
8	2,29	2,30	2,31	2,31	2,32
10	2,21	2,22	2,22	2,23	2,23
20	1,86	1,85	1,85	1,84	1,84
30	1,56	1,54	1,54	1,53	1,53
60	0,95	0,91	0,90	0,88	0,87
90	0,59	0,54	0,53	0,51	0,51
120	0,37	0,33	0,32	0,30	0,30
200	0,12	0,10	0,10	0,09	0,09
230	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06
270	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04

Difusividades mássicas testadas para a secagem a 110°C

D_{tijolo} [m ² /s]	$1,52 \times 10^{-8}$ m ² /s
t [min]	Massa de água [g]
0	4,03
2	3,90
4	3,78
6	3,66
8	3,55
10	3,44
20	2,95
30	2,53
60	1,61
90	1,02
120	0,66
200	0,22
230	0,15
270	0,09
300	0,07
330	0,05
360	0,04
390	0,04

Tratamento estatístico da perda de massa de água para diferentes valores de difusividade mássica no tijolo cerâmico.

Temperatura de secagem	D_{tijolo} [m²/s]	E_M (%)	dV²
60°C	2,00x10 ⁻⁹	20,49	0,28
60°C	2,33x10 ⁻⁹	17,94	0,22
60°C	8,00x10 ⁻⁹	17,42	0,10
60°C	1,00x10 ⁻⁸	17,46	0,06
60°C	1,40x10 ⁻⁸	18,18	0,06
60°C	2,33x10 ⁻⁸	19,66	0,06
80°C	1,30x10 ⁻⁸	27,29	1,14
80°C	3,00x10 ⁻⁸	23,03	1,00
80°C	4,00x10 ⁻⁸	22,29	0,98
80°C	8,00x10 ⁻⁸	21,13	0,94
80°C	1,20x10 ⁻⁷	20,72	0,92
110°C	1,50x10 ⁻⁷	50,26	3,08

APÊNDICE D – Captação da temperatura do tijolo

Evolução temporal da temperatura média do tijolo e do coeficiente de calor convectivo para a secagem a 60°C.

t [min]	T [°C]	
	Experimental	Numérico
0	27,4	27,42
2	42,2	28,19
4	49,9	28,94
6	53,8	29,67
8	56,6	30,38
10	58,4	31,07
20	59,7	34,29
30	59,8	37,16
60	59,8	43,96
90	59,9	48,74
120	59,9	52,09
200	59,9	56,91
230	59,9	57,83
270	59,9	58,64

Evolução temporal da temperatura média do tijolo e do coeficiente de calor convectivo para a secagem a 80°C.

t [min]	T [°C]	
	Experimental	Numérico
0	27,9	27,9
2	50,8	29,1
4	62,3	30,3
6	70,1	31,4
8	74,3	32,5
10	76,4	33,5
20	79,5	38,5
30	79,5	42,9
60	80,0	53,6
90	80,0	61,2
120	80,0	66,6
200	80,0	74,5
230	80,0	76,1
270	80,0	77,5

Evolução temporal da temperatura média do tijolo e do coeficiente de calor convectivo para a secagem a 110°C.

t [min]	T [°C]	
	Experimental	Numérico
0	27,9	27,9
2	40,1	29,7
4	52,6	31,4
6	64,0	33,0
8	74,7	34,7
10	79,1	36,3
20	98,3	43,7
30	105,7	50,4
60	109,2	66,7
90	110,0	78,4
120	110,0	87,0
200	110,0	100,1
230	110,0	102,8
270	110,0	105,3
300	110,0	106,5
330	110,0	107,5
360	110,0	108,2
390	110,0	108,7