



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ERIC DE ARAUJO FACUNDO

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS TÉRMICO E MÁSSICO DA SECAGEM EM
TIJOLOS MACIÇO VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

CARÚBAS

2021

ERIC DE ARAUJO FACUNDO

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS TÉRMICO E MÁSSICO DA SECAGEM EM
TIJOLOS MACIÇO VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em ciência e tecnologia.

Orientador: Profa. Dra. Rosilda Sousa Santos

CARAÚBAS

2021

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

F143a Facundo, Eric .
ANÁLISE DOS PARÂMETROS TÉRMICO E MÁSSICO DA
SECAGEM EM TIJOLOS MACIÇO VIA FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL / Eric Facundo. - 2021.
68 f. : il.

Orientadora: Rosilda Sousa Santos.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2021.

1. Simulação numérica. 2. tijolo maciço. 3.
transferência de calor e massa. 4. CFD. I. Sousa
Santos, Rosilda, orient. II. Título.

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)
ERIC DE ARAUJO FACUNDO

ANÁLISE DOS PARÂMETROS TÉRMICO E MÁSSICO DA SECAGEM EM TIJOLOS MACIÇO VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Trabalho de conclusão de curso apresentada à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel ciências e tecnologia.

Defendida em: 31 / 05 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Rosilda Sousa Santos (UFERSA)
Presidente

Profa. Dra. Rejane Ramos Dantas (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. Diego David Silva Diniz (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico esse trabalho primeiramente há Deus, pois sem sua permissão nada disso seria possível. E em especial aos meus pais, Francisco Facundo Neto e Edivalda Batista de Araujo Facundo que sempre foram minha base, e nunca mediram esforços para me apoiar nos meus objetivos, e todos meus familiares que sempre me deram apoio ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por sempre me dar forças e coragem para nunca desistir, e proporcionar mais essa realização em minha vida.

Agradeço aos meus pais Francisco e Edivalda, por sempre me incentivar a ir em frente e por todos os sacrifícios feitos por mim, pelos meus sonhos.

Agradeço a minha namorada e companheira Lara Vitória Barbosa Soares que sempre esteve comigo, me apoiando, me aconselhando e se fazendo presente mesmo quando estando distante.

Agradeço as minhas tias, Ana Facundo e Selma Batista por serem como mães para minha pessoa, e não medir esforços para me apoiarem.

Agradeço aos meus irmãos Erica de Araujo Facundo, Edcleverson de Araujo Facundo, Vinicius Facundo Xavier e a toda minha família pelo apoio e participação na minha trajetória.

Agradeço minha orientadora Rosilda Sousa Santos por ter me conduzido no projeto, pela paciência e o conhecimento transmitido.

Agradeço a Banca Examinadora pela disponibilidade e contribuição para o meu trabalho.

Agradeço aos meus amigos que participaram e contribuíram direta ou indiretamente, onde compartilharam de momentos felizes e tensos durante todo esse período. Em especial a Edson Alves Silva, Láine de Carvalho Lopes e Rayla da Costa Sousa.

*“Mas aqueles que esperam no Senhor renovam
as suas forças. Voam alto como águias; correm
e não ficam exaustos, andam e não se cansam”.*

Isaías 40:31

RESUMO

Sendo a cerâmica um material amplamente utilizado e de grande importância econômica, o seu processo de secagem vem sendo estudado devido à ocorrência inúmeros fenômenos, além de um alto consumo energético que acontece nessa etapa de fabricação. A utilização de tecnologias de simulação numérica possibilita alterar as condições operacionais e geométricas do objeto de secagem, tudo isso com baixo custo e de forma relativamente fácil. Diante disso, este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar o processo de secagem de tijolos cerâmicos maciço, considerando como um meio sólido, via Fluidodinâmica Computacional (CFD), nas seguintes condições experimentais: temperatura de secagem de 60 °C e 80°C, teor de umidade inicial de 0,001734 e 0,00158 (kg/kg, b.s.) e umidade relativa do ar 10.1% e 5%, respectivamente. O fenômeno de secagem do tijolo maciço foi estudado isoladamente, considerando o modelo de secagem por difusão líquida. Foram analisados os resultados da temperatura e fração volumétrica da água no interior do tijolo obtido pelo pacote comercial ANSYS CFX® 19.2. Comparando o teor de umidade e temperatura simulados com os dados experimentais pode-se validar os resultados numéricos, estimando assim o coeficiente de difusão de massa e o coeficiente de transferência de calor da superfície do material. Os resultados obtidos nas simulações mostram com a existência de importantes gradientes de temperatura e umidade, que áreas podem acarretar rachaduras e deformações.

Palavras – chave: Simulação numérica. tijolo maciço. transferência de calor e massa. CFD.

ABSTRACT

Being the ceramic a widely used material and with great economic importance, its process of drying has been studied due to the occurrence of numerous phenomena, beyond a high energy consumption that happens in this stage of manufacturing. The use of numerical simulation technologies can alter the operating conditions and geometric of the drying object, all of this at low cost and relatively easy. Therefore, this job was carried out with the purpose of studying the drying process of massive ceramic bricks, considering it a solid means by Computational Fluid Dynamics (CFD), under the following experimental conditions: drying temperature of 60 ° C and 80 ° C, initial moisture content of 0.001734 and 0.00158 (kg / kg, bs) and relative humidity of 10.1% and 5%, respectively.

The massive brick drying phenomenon was studied isolately, considering the drying model by liquid diffusion. The results of the temperature and volumetric fraction of water inside the brick obtained by the ANSYS CFX software package[®] 19.2. Comparing the moisture and temperature simulated with experimental data can validate the numerical results, estimating the coefficient of mass diffusion and coefficient heat transfer from the surface of material. The results obtained in simulations show with the existence of important temperature and humidity gradients, which areas can shed cracks and deformations.

Keywords: Numerical simulation. solid brick. heat and mass transfer. CFD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Amostra de uma argila	20
Figura 2.2: Tijolo maciço	22
Figura 2.3: Cadeia produtiva do tijolo cerâmico.....	23
Figura 2.4: Extração da argila.....	23
Figura 2.5: Misturador de argila	24
Figura 2.6: Corte do tijolo após a extrusão	25
Figura 2.7: Galpão de secagem de tijolos cerâmicos	26
Figura 2.8: Secador artificial de tijolos.....	27
Figura 2.9: Secador artificial de tijolos.....	29
Figura 2.10: Exemplo de armazenagem do tijolo maciço	29
Figura 3.1: Fotografia de um tijolo maciço.....	35
Figura 3.2: Representação da malha numérica do tijolo maciço.....	35
Figura 3.3: Fluxograma da metodologia adotada nas simulações numéricas.....	41
Figura 4.1: Temperatura da superfície do tijolo em função do tempo de secagem. a) ($T = 60^{\circ}\text{C}$, $UR = 10,1\%$ e b) $T = 80^{\circ}$, $UR = 5\%$	42
Figura 4.2: Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo de secagem. a) ($T = 60^{\circ}\text{C}$, $UR = 10,1\%$) e b) ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $UR = 5\%$)	43
Figura 4.3: Temperaturas do tijolo em função do tempo no tijolo para diferentes condições de secagem.....	45
Figura 4.4: Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo para diferentes condições de secagem.....	45
Figura 4.5: Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 60°C , nos tempos de secagem de (a) 0 min e (b) 10 min.....	46
Figura 4.6: Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 60°C , nos tempos de secagem de (a) 1 hora e (b) 4,5 horas.....	47
Figura 4.7: Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 80°C , nos tempos de secagem de (a) 0 min e (b) 10 min.....	48

Figura 4.8: Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 80°C, nos tempos de secagem de (a) 1 hora e (b) 4,5 horas.....	49
Figura 4.9: Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 60°C, nos tempos de secagem de a) 0,0 min e b) 10 min.....	51
Figura 4.10: Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 60°C, nos tempos de secagem de a) 1 hora e b) 4,5 horas.....	52
Figura 4.11: Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 80°C, nos tempos de secagem de a) 0,0 min e b) 10 min.....	53
Figura 4.12: Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 80°C, nos tempos de secagem de a) 0,0 min e b) 10 min.....	54
Figura 4.13: Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ para a temperatura de 60°C, nos tempos de secagem de a) 0,0 min e b) 10 min.....	55
Figura 4.14: Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ para a temperatura de 60°C, nos tempos de secagem de a) 1 hora e b) 4,5 horas.....	56
Figura 4.15: Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ para a temperatura de 80°C, nos tempos de secagem de a) 0,0 min e b) 10 min.....	57
Figura 4.16 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ para a temperatura de 80°C, nos tempos de secagem de a) 1 hora e b) 4,5 horas.....	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Resistência mínima à compressão em relação à categoria.....	22
Quadro 2.2: Tipo de secagem e principais vantagens e desvantagens.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Parâmetros experimentais usados nas simulações numéricas.....	38
Tabela 3.2: Propriedades termo físicas do ar e da argila usadas nas simulações.....	40
Tabela 3.3: Coeficiente de difusão de massa.....	40
Tabela 4.1: Estudo de casos.....	46

LISTA DE SIGLAS

ABCERAM - Associação Brasileira de Cerâmica

ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica

CFD – Computational Fluid Dynamic (Fluidodinâmica Computacional)

ICEMEG - Industria e Comercio de Equipamentos Metalúrgicos

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

ANICER – Associação Nacional da Industria Cerâmica

NOMENCLATURA

Letras Latinas

As	Área superficial	[m ²]
b.s	Base Seca	[b.s]
D	Coeficiente difusão de massa	[m ² /s]
ERMQM	Erro quadrático médio do teor de umidade	[(kg/kg) ²]
Fo, m	Número de Fourier de transferência de massa	[-]
hm	Coeficiente de transferência de massa	[m/s]
hc	Coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² . K]
k	Condutividade térmica	[W/(m.K)]
mo	Massa inicial do produto	[kg]
m (t)	Massa do produto no tempo	[kg]
ma	Massa de água do tijolo	[kg]
ms	Massa do tijolo seco	[kg]
m	Massa de água	[kg]
meq	Massa de água na condição de equilíbrio	[kg]
M	Teor de umidade do produto em base seca	[kg/kg]
$\bar{M}$	Teor de umidade médio em base seca	[kg/kg]
$\bar{M}^*$	Teor de umidade médio adimensional	[-]
Me	Teor de umidade de equilíbrio em base seca	[kg/kg]
Mo	Teor de umidade inicial em base seca	[kg/kg]
N	Número de elementos da malha	[-]
n	Número de pontos experimentais	[-]
Q' conv	Taxa de transferência de calor	[W]
S	Área superficial do sólido	[m ²]

T_o	Temperatura inicial do produto	[°C]
T^*	Temperatura adimensional	[-]
T	Temperatura do ar de secagem	[°C]
t	Tempo de secagem	[s]
T_s	Temperatura na superfície do tijolo	[°C]
T_e	Temperatura de equilíbrio do produto	[°C]
UR	Umidade relativa	[%]
V	Volume do tijolo	[m³]

Letras Gregas

ρ	Densidade (massa específica)	[kg/m³]
σ	Desvio padrão	[-]
Δ	Variação	[-]
∇	Divergente	[-]

Sobrescritos

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

Subscrito

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

SUMÁRIO

1	CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	HISTÓRICO	18
2.2	ARGILA	19
2.3	PROPRIEDADES DA ARGILA	20
2.4	TIJOLOS MACIÇOS	21
	2.4.1 Processo de fabricação.....	22
2.5	PROCESSO DE SECAGEM	30
2.6	ESTUDOS EXPERIMENTAIS.....	31
2.7	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFX)	32
3	CAPITULO 3 – METODOLOGIA	34
3.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA FÍSICO	34
3.2	MALHA NUMÉRICA	35
3.3	MODELAGEM MATEMÁTICA	36
	3.3.1 Equações governantes	36
	3.3.1.1 Secagem de tijolo maciço	36
3.4	CASOS ESTUDADOS	38
	3.4.1 Casos experimentais	38
	3.4.2 Parâmetros mássicos e térmicos do produto	39
4	Capitulo 4 – RESULTADOS E DISCURSSÕES	42
4.1	CASOS ESTUDADOS	42
	4.1.1 Secagem do tijolo maciço	42
	4.1.1.1 Cinética de secagem e aquecimento	42
	4.1.1.2Distribuição de temperatura e teor de umidade do tijolo	46
5	CAPITULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	60
5.1	CONCLUSÕES	60

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	61
REFERÊNCIAS	62

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A evolução da humanidade é marcada pela adaptação do homem as condições do ambiente e a transformação do ambiente de acordo com suas necessidades (MENDONÇA, 2002). Dessa forma o aperfeiçoamento de técnicas e processo além da busca por melhorias, marca a constante evolução do homem nas suas atividades. O *homo sapiens* é responsável por consolidar a relação do homem e os recursos naturais, como a argila ao descobrir a habilidade de manipular o fogo há cerca de 250.000 anos. A 7.000 a.c, antes da idade da pedra o homem já fazia uso do barro, no entanto sem muita funcionalidade. A partir do momento em que o homem passa a ser nômade, surgem novas necessidades o qual, passa a usar o barro para fazer utensílios e casas em busca de maior conforto e comodidade (KAWAGTJTI, 2004).

O Brasil é rico em recursos naturais, não sendo diferente para a matéria prima de uso na indústria cerâmica, o país tem grandes reservas desses minerais espalhados por toda sua extensão. Nas regiões sudeste e sul se destacam, pois apresentam maior desenvolvimento, tudo isso ligado à estrutura da região que é bem superior comparado as demais, dispondo de tecnologias, equipamento industriais, centros de pesquisas entre outros fatores que acelera o crescimento, aliado com abundância de matéria prima. No entanto regiões como a nordeste do país vem ganhando espaço e se desenvolvendo no setor cerâmico, com implantações de fabricas devido à grande demanda dos setores da construção civil (ABCERAM, 2021).

No Brasil a indústria da construção civil tem um grande índice de consumo, tratando-se em termos da cerâmica vermelha, a exemplo de materiais como blocos, tijolos, telhas, tubos para saneamento entre outros, que proporcionam uma representatividade de 4,8% da indústria da construção civil (SEBRAE, 2015). Segundo Branco (2014) pelo menos 90% da argila (matéria prima) é utilizada para fabricação de materiais de construção. Com isso a cerâmica vermelha fatura anualmente em torno de 18 bilhões, representando cerca de 1% do PIB (Produto Interno Bruto), espalhado pelas 9.071 pequenas empresas que compõe o setor ao longo do país, tendo produções mensais de em média 4,3 bilhões entre telha, bloco e tijolos (SEBRAE, 2015).

A massa argilosa a qual é utilizada para fabricação da cerâmica vermelha, é obtida a partir da sua conformação, em que passa por um processo lento de secagem com o intuito de retirar grande parte da água (MEDEIROS *et al.*, 2016).

Com intuito de evitar perca na qualidade do produto final, o processo de secagem deve ocorrer de forma controlada, para que aconteça uniformemente e com isso prevenir-se gradientes elevados de temperatura e umidade no interior do material. Tendo em vista que a secagem afeta o processo de transferência de calor e massa, sendo que durante a secagem é alterado propriedades físicas e químicas do material, independentemente se é feita por condução, convecção ou difusão, é de suma importância conhecer e controlar tais efeitos (SANTOS, 2018).

A secagem é uma das etapas de operações unitárias mais complexas e com alto consumo energético. Dessa forma é de grande importância a utilização e criação de novas tecnologia com o intuito otimizar a secagem de produtos cerâmicos, visando a diminuição de tempo para se chegar à umidade ideal, os gastos energéticos e garantir a qualidade do produto. A simulação numérica é um exemplo de tecnologia em que é possível reproduzir o estudo experimental da secagem, possuindo diversas vantagens em relação aos trabalhos feitos em laboratórios e em plantas-piloto (ARAÚJO, 2019).

1.1. OBJETIVO GERAL

Estudar, através da simulação numérica, o processo de secagem do tijolo maciço.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Demonstrar um método novo de estudo da secagem de materiais cerâmicos a partir da simulação numérica, não apenas no domínio sólido, mas também no domínio fluido que circunda a amostra;
- Simular numericamente através do ANSYS CFX;
- Analisar os dados da simulação do fenômeno de secagem do tijolo através de variáveis como: teor de água e temperatura;
- Comparar os resultados obtidos, com os já existentes na literatura sobre o assunto;
- Estimar os coeficientes de transporte de calor e massa dos materiais cerâmicos submetidos a secagem.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DA CERÂMICA

Tendo grande aplicabilidade desde práticas artísticas com a produção de artefatos com fins estéticos, até as atividades industriais para obtenção de produtos para construção civil, a cerâmica tem destaque em outras práticas como sua utilização em tecnologia de ponta, mais especificamente na fabricação de componentes de foguetes espaciais, devido à sua durabilidade (ANFACER, 2021).

Segundo o Sebrae (2008) estudos na área de arqueologia revela ocorrência de objetos cerâmicos partir do período pré neolítico (25000 a.c.). No entanto em torno de 5000 a 6000 a.c. que se tem evidências de materiais voltados à construção civil tais como tijolos, blocos e telha.

Na transição da saída do homem da caverna para se tornar agricultor, junto veio novas necessidades como abrigos e objetos para carregar água e armazenar alimentos, onde através da facilidade de fabricação e características como resistência e impermeabilidade para tais utensílios a argila foi o material utilizado, deixando assim, vestígios das civilizações que existiram milhares de anos antes da Era Cristã (ANFACER, 2021).

A fabricação de cerâmica no Brasil teve início com os povos indígenas, onde há mais de 2.000 anos em algumas regiões do país, os nativos manipulavam a argila para confecção de peças para carregar água e se alimentarem. Devido à falta de conhecimento, os artefatos encontrados mostravam pouca resistência por terem sido queimados de forma errada, pois o processo de queima era feito em fogueiras. Sendo encontrado na ilha de Marajó uma cerâmica mais elaborada, que aponta uma ascensão na cultura indígena na ilha. Porém estudos apontam a presença de uma cerâmica mais simples ocorrida há mais de 5000 anos na região amazônica. Com a colonização, foram instaladas as primeiras olarias, substituindo o tipo de fabricação rudimentar dos nativos e implantando tecnologias da época para peças com melhores acabamentos e certa padronização (SEBRAE, 2008).

A partir dos anos 80 e 90 que o setor cerâmico brasileiro teve evoluções tecnológicas, onde teve uma reestruturação com aquisição de equipamentos modernos, com incremento de melhores métodos de gestão e aperfeiçoamento pessoal (SANTOS Jr.*et al.*, 2017).

Atualmente, o Brasil está entre os maiores produtores e consumidores de cerâmica, representando 4,8% da indústria da construção civil, o equivalente a 1% do PIB com faturamento anual de 18 bilhões. A indústria da cerâmica vermelha é composta por cerca de 9.071 pequenas empresas que produzem mensalmente em média 4,3 bilhões entre telha, bloco e tijolos. Isso proporciona em torno de 400 mil empregos diretos e 1,5 milhões indiretos (ANICER, 2021).

A cerâmica no Brasil teve grande evolução, tendo seus produtos atingindo o patamar de qualidade a nível mundial. Tudo isso deve-se ao fato de o Brasil ter em abundância a matéria prima a qual é usada na indústria cerâmica, além de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais e fontes de energia alternativa. As regiões sudeste e sul se destacam, pois apresentam maior desenvolvimento, tudo isso ligado à estrutura da região que é bem superior comparado com as demais, dispondo de tecnologias, equipamento industriais, centros de pesquisas entre outros fatores que acelera o crescimento, aliado com a quantidade de matéria prima disponível. No entanto regiões como a nordeste do país vem ganhando espaço e se desenvolvendo no setor cerâmico, com implantações de fábricas impulsionado pela grande demanda dos setores da construção civil (ABCERAM, 2021).

Atualmente a indústria ceramista brasileira é possível ver a mesma com subdivisões em setores com características bem individuais e níveis de avanços tecnológicos distintos. A cerâmica vermelha compõe aqueles agregados da construção civil de cor avermelhada, dentre eles tijolos, blocos, telhas lajes, elementos vazados, tubos cerâmicos e argila expandida, além de utensílios de uso domésticos e adornos (ANFACER, 2021).

A cerâmica no Brasil apresenta muita dificuldade em acompanhar o seu desenvolvimento e aprimorar sua competitividade, pois é muito complicado obter dados indicadores de desempenho no setor. Junto a isso, a cerâmica vermelha ainda tem inúmeros problemas relacionados à qualidade dos produtos e o meio ambiente, o que é preocupante pela sua importância, em principal para construção civil (SANTOS Jr.*et al.*, 2017).

2.2 ARGILA

Segundo Branco (2014), argila é o nome de um depósito formado por partículas muito pequenas com diâmetro inferior a 1/256 mm (4 microns). Tal sedimento pode ser formado apenas por um tipo de mineral de argila, porém comumente é formado pela mistura de minerais com predominância de um tipo. No entanto, todos são silicatos em camadas

com baixa dureza, baixa densidade e clivagem boa em uma direção (ou seja, silicatos em folha/lâminas). No comércio desses materiais, rochas argilosas, como folhelho e siltito, também são incluídas neste conceito. A amostra de uma argila pode ser vista na figura 2.1.

Figura 2.1 Amostra de uma argila.



Fonte: Silva (2017).

As argilas são compostas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, isso segundo o ponto de vista mineralógico e químico, ou também de ferro e magnésio em geral cristalino, onde são denominados argilominerais, podendo ainda ter outros minerais como matéria orgânica e sais solúveis (ALMEIDA, 2009).

Sendo um material terroso natural a argila mostra uma plasticidade alta quando misturada com a água. Elas são compostas por pequenas partículas constituídas de um número estrito de argilominerais (NASCIMENTO, 2007).

2.3 PROPRIEDADES DA ARGILA

A aplicação industrial das argilas é baseada basicamente em suas propriedades físico-químicas, sendo que as propriedades físico-químicas advêm de três fatores: tamanho pequeno das partículas (menor que 4 microns), morfologia dos cristais (em camadas) e substituição isomórfica ocorridas em tais minerais (BRANCO, 2014).

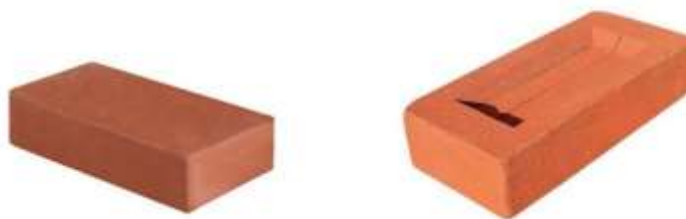
Branco (2014), ainda destaca algumas propriedades da argila:

- Elevada área superficial: Devido a tal propriedade com as ligações químicas não saturadas, permite sua interação com inúmeras substâncias. Por esse fator a argila fica plástica a ser misturada com a água;

- Capacidade de troca de cátions: Os íons positivos da solução aquosa em contato com a argila penetram facilmente entre as camadas do argilomineral e, devido à sua fraca ligação química, também é fácil abandoná-la. Eles não penetram na estrutura mineral, mas apenas aderem-se à superfície das partículas de argila. Às vezes, essa troca iônica também pode ser realizada em um meio não aquoso. Essa propriedade tem grande importância na plasticidade, já que dependendo se o cátion trocável é o cálcio ou o sódio, as propriedades plásticas mudam;
- Capacidade de absorção: Podendo reter até mais de 100% de água em relação a seu peso;
- Hidratação e inchamento: Sendo características principalmente das argilas montmorilonita, para essa propriedade a água vai ficando retida entre as camadas e com isso ocorre a separação das folhas e assim o aumento do volume;
- Plasticidade: Devido a sua estrutura molecular em camadas ou folhas, a água ao ser introduzida fica entre as camadas servindo como um lubrificante e assim ocasionando o deslizamento das folhas umas sobre as outras;
- Tixotropia: É uma propriedade que possibilita um mineral argiloso em estado de pó de transformar em gel ao ser suspenso em muita água. Esse tipo de argila se torna líquido quando amassada e volta a ser coesa e sólida quando deixada em repouso.

2.4 TIJOLOS MACIÇOS

Os tijolos maciços são fabricados a partir da argila comum, não possuindo espaços vazios, e com isso traz bom conforto acústico e térmico. Seu molde é de arestas retilíneas e considerados tijolos capazes de resistir a temperaturas elevadas. A figura 2.2 e a tabela 2.1 mostram respectivamente dois tipos de tijolos maciço, e as categorias dos tijolos de acordo com a resistência a compressão.

Figura 2.2 Tijolo maciço.

Fonte: guidugli construção e acabamento (2021).

Quadro 2.1 Resistência mínima à compressão em relação à categoria

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

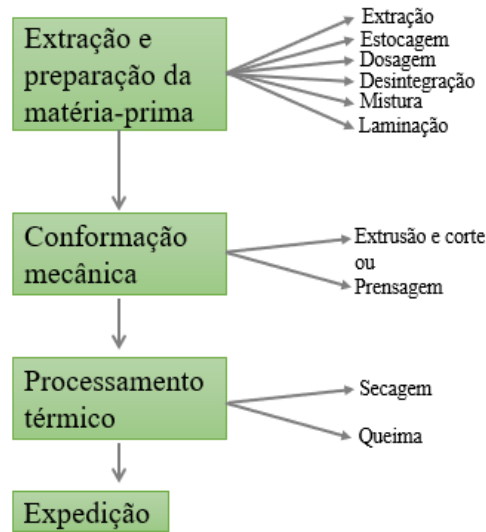
Fonte: ABNT- NBR 7170 (1983).

2.4.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Comparado a outros segmentos da indústria cerâmica, os métodos de produção da cerâmica vermelha são pouco evoluídos. Porém, algumas empresas com inovações tecnológicas, vem ganhando destaque, com o aumento da produção de materiais com qualidade. Evoluções essas voltadas a base industrial com o objetivo de ter equipamentos automatizados e assim reduzir custos da mão de obra (SILVA, 2009). Autores como (SILVA, 2009), (VILLAR, 1988; SUDENE E ITEP, 1996; MAFRA, 1999), (ARAUJO, 2019), (OLIVEIRA E BERNILS, 2006), (PAULETTI, 2001), descrevem e esquematizam o processo de fabricação da seguinte forma:

Figura 2.3 ilustra o fluxograma da cadeia produtiva do tijolo maciço cerâmico.

Figura 2.3 Cadeia produtiva do tijolo cerâmico.



Fonte: Araujo (2019).

a) Extração e preparação das matérias-primas:

- Extração: Nesse processo é utilizado máquinas como retroescavadeira para retirada da argila, no geral as jazidas ficam próxima das empresas por questões de logística. Dessa forma a matéria prima é transportada para os galpões de estocagem. A figura 2.4 mostra o processo de extração.

Figura 2.4 Extração da argila.



Fonte: Bela vista tijolos (2021)

- Estocagem: Nessa etapa que é conhecida como “descanso” ou “sazonamento”, o material sofre alterações químicas e descompactação, que irá trazer benefícios ao processo produtivo e garantindo produção nas épocas chuvosas. Se necessário usa-se duas ou mais argilas para produção, daí se faz a pré-mistura, podendo ser realizada manualmente ou por pás carregadeiras de acordo com o percentual de cada matéria-prima utilizada, obtendo-se uma massa única e homogênea.
- Dosagem: Já nessa etapa a argila é levada ao caixão alimentador dosador ou diretamente às correias transportadoras, onde ambas as matérias-primas são dosadas de forma proporcional, dependendo de suas características cerâmicas.
- Desintegração: Em alguns processos as argilas extraídas são muito duras e em torrões, sendo necessário passar por um desintegrador, para triturar os aglomerados maiores de argila, e assim facilitar as operações subsequentes.
- Mistura: Aqui a matéria prima passa pelo misturador, que é um equipamento capaz de realizar movimentos circulares sendo responsável pela homogeneização da massa e introdução de água na mistura, com o intuito de obter a umidade de 18% a 30% e plasticidade adequada para extrusão. Na figura 2.5 é mostrado um tipo de misturador.

Figura 2.5 Misturador de argila.



Fonte: Bela vista tijolos (2021)

- Laminação: Agora com finalidade de completar a mistura e fazer um adensamento, a argila passa pelo laminador, onde ainda o mesmo elimina bolhas de ar ou glomerados remanescentes, antes argila ser levada a extrusora. Em alguns casos as extrusoras podem ter um laminador acoplado na entrada do equipamento (VILLAR, 1988; SUDENE E ITEP, 1996; MAFRA, 1999).

b) Conformação mecânica:

Consiste em obter produtos com formas, dimensões e espécies mais variadas a partir de uma massa plástica de argila. Tem-se alguns tipos de processos para dar forma às peças cerâmicas, e a seleção de um deles depende fundamentalmente de fatores econômicos, da geometria e das características do produto. Os métodos mais utilizados compreendem: extrusão, corte e prensagem (SILVA, 2009).

- Extrusão: Através da extrusora, equipamento o qual dá o formato ao produto. Por meio de um propulsor a massa é impulsionada, onde por meio de uma chapa de aço perfurada, lançada para dentro de uma câmara de vácuo. Na câmara de vácuo é retirado o ar e o material é extraído por outro parafuso sem fim, conformando a massa no formato desejado. Quando sai da extrusora, o material contínuo é cortado nos tamanhos e forma padronizados (ARAUJO, 2019).

- Corte: o bloco do material extrudado é contínuo, e cortado nos tamanhos padronizados por meio de cortadeira manual ou automática, acoplada a extrusora, 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 E BERNILS, 2006). A figura 2.6 mostra uma máquina de corte do tijolo após extrusão.

Figura 2.6 Corte do tijolo após a extrusão.



Fonte: Cyberspaceandtime (2021)

-Prensagem: Sendo uma alternativa à extrusora a prensagem tem como objetivo conformar a peça, dando-lhe resistência mecânica suficiente para suportar as inúmeras solicitações ao longo do processo produtivo, além de proporcionar peças uniformes, de acordo com as dimensões e a geometria pré-estabelecidas (ARAUJO, 2019). Segundo Silva (2009) a técnica permite que o produto final apresente as características microestruturais desejadas como,

porosidade, distribuição de tamanho de poros, tamanho de partículas, entre outras, que irão determinar as características técnicas da peça como, resistência mecânica e absorção de água por exemplo. A prensagem é bastante utilizada na produção de tijolos ecológicos.

c) Processamento térmico:

São compostas por etapas como secagem e queima das peças conformadas. Onde ocorrem perdas de umidade e as transformações na estrutura e composição, que são responsáveis por obter as propriedades finais das peças, como cor, brilho porosidade, resistência, à flexão, ao gretamento e a altas temperaturas, além de ataques de agentes químicos, entre outras (PAULETTI, 2001).

- Secagem: Essa etapa é responsável pelo uso de grande quantidade de energia térmica na evaporação da água inicialmente colocada para realizar a moldagem, que deve ser de forma lenta e uniforme, objetivando reduzir a umidade entre 20 a 25%, para uma taxa de 3 a 10% ao fim da secagem, ocasionando uma contração no material de 4 a 10%. O Processo de secagem pode ser de forma natural ou artificial. Quando natural, as peças são empilhadas em galpões colocadas em prateleiras ou mesmo no chão. O tempo de secagem depende da temperatura, umidade relativa e ventilação do ambiente. A figura 2.7 mostra a secagem de tijolo de forma natural em um galpão.

Figura 2.7 Galpão de secagem de tijolos cerâmicos.



Fonte: Araújo (2019).

Na secagem artificial utiliza-se câmaras de secagem com temperatura entre 80 e 110°C, onde os secadores mais comuns são os estáticos do tipo continuo ou semi-continuo. O tempo de secagem, depende das características da argila, da forma das peças e o tipo de

secador, no entanto demora em média de 12 a 40 horas (PAULETTI, 2001). A figura 2.8 mostra um secador artificial para tijolos.

Figura 2.8 Secador artificial de tijolos.



Fonte: Alibaba (2021).

No quadro 2.2 mostra o comparativo dos pontos positivos e negativos da secagem de forma natural e superficial para tijolos maciços. Analisando os tópicos podemos perceber que o artificial se torna mais adequado. Pois, por meio desse modelo de secagem, o gasto que é tido com a geração de calor, pode ser recuperado com o aumento da produção em menor tempo, além do aumento da qualidade dos produtos e menor perdas de peças.

Quadro 2.2 Tipo de secagem e principais vantagens e desvantagens.

Tipo de secagem	Vantagens	Desvantagens
Natural	• Menos custo de geração de calor; • Favorece os locais em que as condições climáticas são mais favoráveis	• Tempo elevado de secagem; • Baixa produção; • Dependência do fator climático; • Pode-se afetar a qualidade das peças (trincas, deformações, de homogeneidade de secagem) caso o processo não seja bem controlado.
Artificial	• Menor tempo de secagem; • Maior produtividade; • Redução de perdas; • Melhoria da qualidade das peças.	• Custo com geração de calor; • Requer mais conhecimento técnico do operador; • Exige equipamentos e controles, como termômetros e higrômetros.

Fonte: Junior *et al.*, (2013)

- Queima: Ocorre em fornos com temperaturas entre 750 a 900°C, podendo demorar dias. Nessa etapa ocorre transformações físico-químicas na massa argilosa devido ao calor, modificando-se características de cru em propriedades cerâmicas. Algumas características como a contração linear, resistência mecânica, porosidade e absorção são dependentes da boa execução das etapas de secagem e queima (ARAÚJO, 2019). A Figura 2.9 um modelo de forno túnel para queima de telhas e tijolos. O processo de queima do tijolo é representa na figura 2.9.

Figura 2.9 Forno túnel para queima de telhas e tijolos.



Fonte: ICEMEG, 2018.

- Resfriamento: Terminada a queima o produto continua no forno até seu resfriamento, que terá seu tempo de acordo com produto em questão (ARAÚJO, 2019).

d) Expedição

Segundo Almeida (2009) o processo de expedição ocorre nas seguintes etapas:

- Inspeção: Durante a saída do forno é distribuído os produtos. Poucas empresas fazem testes em laboratórios de amostras das peças produzidas, no geral a inspeção ocorre de forma apenas visual.

- Armazenamento: No geral os produtos prontos ficam em áreas cobertas, muita das vezes colocados em pallets e embalados por plástico. Na figura 2.10 mostra um exemplo de armazenagem de tijolos maciços.

Figura 2.10 Exemplo de armazenagem do tijolo maciço.



Fonte: Desterro construções (2021).

- Entrega: Como feito por algumas empresas, o material é embalado em paletes, e dessa forma o carregamento e o transporte até o cliente fica mais fácil e com menos riscos de danificar o produto.

2.5 PROCESSO DE SECAGEM

Segundo Araújo (2019) o processo de secagem é a primeira etapa que deve ser levado em consideração, pois dependendo de como seja realizada pode ocasionar futuros danos e uma baixa qualidade no produto final. As circunstâncias de uma secagem irregular e seus efeitos na qualidade, interfere na economia do processo ou ainda a comodidade de operação do produto final. Dessa forma, quando se tem processos otimizados na produção de materiais cerâmicos, tais como o tijolo, tende a ficar com valores mais acessíveis no mercado devido ao menor tempo na fabricação, além de menos desperdício de matéria-prima.

Para Silva (2009) na busca de compreender o mecanismo da secagem, se faz necessário conhecer as propriedades do ar no processo, onde ele atua como um elemento condutor de calor e transporte de vapor de água produzido. A água consome calor e assim passa do estado líquido para o de vapor. Devido a esse consumo a temperatura na superfície do corpo cerâmico diminui. O processo é interrompido pois o ar nas proximidades fica saturado de vapor d'água. Para continuação da secagem, deve-se remover a umidade de sua volta fornecendo calor a peça, e o ar com suas características faz isso com facilidade, especialmente se ele circular, estando aquecido e com umidade relativa baixa.

A água que está distribuída quase que homogeneamente na massa cerâmica após a conformação da peça, necessita ser retirada também de forma homogênea, pois devido a isso ocorre uma diminuição do volume da peça, pelo fato as partículas da massa se aproximam com a saída da água. Caso tal diminuição não ocorra por igual a peça poderá apresentar trincas ou até mesmo se romper. A evaporação começa pela parte mais superficial, e na sequência a água no interior migra para superfície e evapora (SILVA, 2009).

No processo de secagem é de extrema necessidade modelos matemáticos que a simule com grande realismo físico, tendo em vista que nesse processo envolve fenômenos complexos de transferência de calor, massa, quantidade de movimento e variação dimensionais. Para isso é de grande importância colocar no modelo de secagem, a maior quantidade possível de informações, como, mecanismo de transporte de calor e umidade dentro do sólido, coeficiente de difusão, encolhimento, transferência de calor e massa acoplados, condições dos ambientes

externos próximos do sólido, entre outros, sendo assim possível relacionar corretamente o modelo com a situação real. A secagem é um processo termodinâmico em que por meio do fornecimento de energia, acontece a diminuição da umidade do sólido. O transporte de umidade, do interior para a superfície do material pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, isso dependendo do tipo do produto e do percentual de umidade presente. É de fundamental importância o controle da etapa de desumidificação e conhecer o mecanismo do movimento de umidade, onde através dos dados de simulação e/ou experimentais, é possível obter condições ótimas no processo, diminuindo as perdas o produto e o consumo de energia (ALMEIDA, 2003).

Diante dos fenômenos que ocorrem e da complexidade para uma boa execução do processo de secagem, é crucial desenvolver modelos matemáticos, que permita aos engenheiros de projeto escolher as condições de operação mais adequadas e necessárias para a secagem efetiva, e também pode dimensionar o equipamento para secagem de acordo com os parâmetros de operações desejados (ARAUJO, 2019).

Na literatura é possível encontrar soluções analíticas e/ou numéricas da equação de difusão, para diversas geometrias, condições de contorno e coeficientes difusivos constantes ou variáveis, porém poucos são os estudos com resultados científicos obtidos por meio de geometrias tridimensionais. Através da análise uni e bidimensional para descrever o processo tridimensional, é possível encontrar discrepâncias na cinética de secagem, distribuição do teor de umidade e na temperatura no interior do sólido, ao comparar com os resultados experimentais (NASCIMENTO, 2002).

Nascimento (2002) fala ainda que para se ter produtos de qualidade comercial, é necessária uma secagem controlada, pois uma secagem muito lenta se torna economicamente inviável, porém se o produto não secar uniformemente, terá distorções no final. Inspeccionando os parâmetros de secagem, controla-se os coeficientes de transferência convectiva de calor na superfície do material.

2.6 ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Silva *et al.* (2012) realizaram estudo experimental de secagem de tijolos, onde tijolos industriais argilosos foram secos em estufa com condições controladas de temperatura, velocidade e umidade relativa do ar. Quando a massa obteve peso constante, encerraram os experimentos de secagem contínua. Em um período de 48 horas as amostras separadamente

ficaram no forno com mesma temperatura do ar de secagem, e utilizando a pressão atmosférica. Mediante os resultados, observou-se grande influência da temperatura do ar na taxa de secagem, além disso nos vértices dos tijolos, foram encontrados maiores gradientes de umidade tensão e temperatura. No período onde a taxa de secagem é decrescente acontece o processo de secagem.

Khan e Straatman (2016) estudaram a secagem convectiva de materiais porosos. Tais materiais tem como composição água, estrutura sólida e espaços vazios, podendo ter sua classificação mediante a sua natureza higroscópica. Exemplos de materiais higroscópicos são os tomates, madeiras, etc. No processo de secagem convectiva para tais materiais, o ar com umidade relativa baixa é obrigado passar por meio dos poros úmidos, ocorrendo o transporte da umidade na forma de água líquida e vapor de água.

Araujo *et al.* (2017) realizaram um estudo térmico transitório da distribuição de temperatura em um tijolo industrial, por meio do abastecimento de energia de ar quente fluindo em regime turbulento. A análise foi feita utilizando simulação numérica através do software ANSYS® CFX. Ao final foi concluído que, há uma influência da velocidade do ar quente no processo, pois quanto maior ela for, mais o calor se difunde no tijolo, e independentemente da velocidade do ar, ainda existirão gradientes de temperatura na superfície do tijolo.

2.7 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFX)

ANSYS CFX é um software comercial que pode usar o método de volumes finitos para discretizar equações de conservação e relações constitutivas para simular fluxo de fluido e transferência de calor em formas geométricas bi/tridimensionais. A simulação neste software começa com a geração ou importação de malha. Você pode gerar a malha em um software específico, como ICEM CFD e, em seguida, usar ANSYS CFX para definir o modelo físico, as condições de contorno, as propriedades do material e os métodos de resolução de equações e, por sua vez, no pós-processo os dados são obtidos da solução. Uma grande funcionalidade desse código computacional é a possibilidade de inclusão ou modificação de modelos, independentemente se é para consideração de fenômenos físicos ou modificação de esquemas numéricos, por meio de subrotinas em linguagem Fortran. Isso

torna o software uma ferramenta importante e adequado para pesquisas científicas, permitindo ao usuário testar diferentes modelos matemáticos, analisar a influência de determinados parâmetros, sem ser necessário o trabalho complexo de implementação numérica das equações de Navier-Stokes ou outros modelos matemáticos bastante difundidos na literatura (SANTOS, 2019).

No processo de secagem, a CFD é uma das ferramentas mais indicadas para ampliar o conhecimento no que diz respeito a fluxo de fluido, além dos campos de temperatura e umidade nos sistemas de secagem. Sendo utilizados esses conhecimentos no projeto e na otimização de equipamentos de secagem e em estratégias de processamento (ARAÚJO, 2019).

O software ANSYS CFX[®] tem a versatilidade de aceitar uma variedade de condições de contorno e condições iniciais, de forma que o modelo de cálculo pode ser atualizado para diversas situações diferentes. O programa de computador ANSYS CFX[®] modifica apenas o fluxo de condução e os termos transitórios para resolver o transporte padrão e as equações de energia em meios porosos. Atualmente ferramentas de CFD, possibilitam um ambiente de trabalho interativo, onde se chega ao projeto final do equipamento por meio do computador, limitando as experiências finais de ajuste e teste do equipamento em protótipos, isso se deve pela sua integração com outras ferramentas numéricas. A utilização de determinados softwares possibilita vantagens como a obtenção da solução em forma fechada, com redução no tempo de computacional (SANTOS, 2018).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo apresentam-se as etapas realizadas nesta pesquisa, relacionadas ao estudo teórico da secagem do tijolo maciço.

Para a modelagem numérica foi utilizado o pacote comercial ANSYS CFX[®], que é formado por softwares de código fechado, dessa forma já possui equações discretizadas a serem utilizadas para a solução do problema. Este pacote dispõe diversos programas, onde foram utilizados no estudo o ANSYS ICEM-CFD[®] e o ANSYS CFX[®].

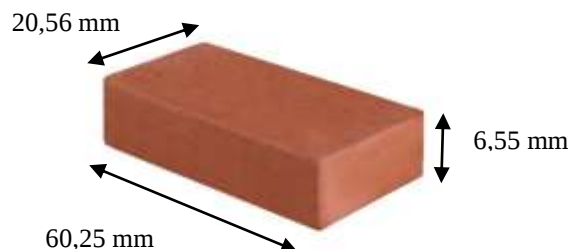
A partir de ponto, curvas e superfícies, foi criada a geometria no ICEM-CFD[®]. Sobreposta a geometria foi construída a malha numérica, que é a subdivisão do domínio espacial em espaços pequenos, chamados de elementos. Em outras palavras, é a discretização de um domínio contínuo para que as equações do fenômeno que esteja ocorrendo possam ser resolvidas pelo computador.

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

3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA FÍSICO

O presente trabalho trata-se do estudo teórico da secagem de tijolos maciços, conforme ilustra a Figura 3.1. As informações experimentais necessárias para a validação da modelagem matemática foram extraídas de Nascimento (2002).

Figura 3.1 Fotografia de um tijolo maciço.



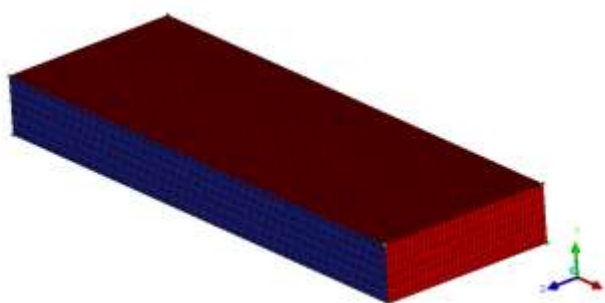
Fonte: Fonte: guidugli construção e acabamento (2021).

3.2 MALHA NUMÉRICA

Tendo posse da geometria criada no ICEM-CFD[®], foi definido, uma estratégia de blocagem (Blocking > Create Block > Initialize Blocks), onde tal procedimento assegura o refinamento ou distribuições dos elementos nas proximidades das paredes do sólido e em regiões onde os gradientes de velocidade, pressão e/ou temperatura são importantes. Dessa forma realizou-se várias blocagens a fim de se obter uma malha de boa qualidade e densidade de pontos nodais compatível com o limite computacional da máquina (computador) disponível para as simulações. Para o trabalho em questão, optou-se por uma malha não estruturada com elementos hexaédricos.

A Figura 3.2 ilustra a malha numérica para o tijolo maciço. A malha é formada por 157.209 elementos e 168.000 nós.

Figura 3.2 Representação da malha numérica do tijolo maciço.



Fonte: Autoral.

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta seção será apresentada a modelagem matemática usada para os estudos da fluidodinâmica e transferências de massa e calor durante o processo de secagem do tijolo. Com o objetivo de realizar as simulações numéricas foram feitas algumas considerações:

1. A água migra no interior do sólido na forma líquida e evapora na superfície;
2. Por meio da convecção na superfície e condução no interior do mesmo o calor é transferido ao material;
3. Geração interna de massa e de calor desprezíveis;
4. Regime de escoamento do fluido sobre o tijolo é transiente e não isotérmico;
5. Não foi considerado o efeito de encolhimento da peça cerâmica;
6. Propriedades termo físicas e mecânicas constantes;
7. Os coeficientes de transferência de massa e de calor convectivos são constantes para todas as faces do sólido.

3.3.1 Equações governantes

O fenômeno de secagem do tijolo maciço foi estudado com base nas equações de conservação de massa e energia, equações 3.1 e 3.2. E tais equações são apresentadas a seguir considerando as hipóteses adotadas.

3.3.1.1 Secagem de tijolo maciço

a) Conservação de massa

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

b) Conservação de energia

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

Sendo:

P = massa específica

M = teor de umidade

H = entalpia do ar

D = coeficiente de difusão de massa

k = condutividade térmica

t = tempo

T = temperatura

c) Condições iniciais e de contorno

condições iniciais:

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

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

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

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

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

d) Teor de umidade médio

A partir da seguinte equação foi determinado o teor de umidade médio, em cada instante de tempo:

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

Sendo que: V = volume do tijolo.

3.4 CASOS ESTUDADOS

3.4.1 Casos experimentais

Esta pesquisa está aplicada a secagem de tijolos maciço. Os dados utilizados nas simulações foram reportados por Nascimento (2002). Para obtenção destes dados, ele procedeu experimentalmente como segue:

Com o intuito de incorporar melhorias nas características físicas desejadas no processo produtivo: as argilas retiradas das jazidas e devidamente tratadas, isto é, secas e moídas (em moinhos de galga ou de bolas), foram peneiradas, umidificadas, homogeneizadas e depois prensadas ou moldadas. Os corpos de prova foram compactados com pressões 2,5 Mpa (NASCIMENTO, 2002).

Depois de compactadas, as amostras foram medidas e pesadas, e logo após levadas para secagem em estufa. Em intervalos de tempo pré-determinados, as amostras eram retiradas da estufa e suas dimensões e massa obtidas. Em seguida, as amostras eram recolocadas na estufa. Todo este procedimento demorava em torno de 1 min. O procedimento foi repetido até que a massa final pudesse ser obtida. No fim da secagem, as amostras permaneciam por mais 24 horas na estufa, com o mesmo nível de temperatura do ensaio realizado, para medida da sua massa de equilíbrio, e em seguida eram retiradas destas, e levadas para outra estufa cuja temperatura era mantida a 110° C e permaneciam neste nível de temperatura por mais 48 horas para medida de sua massa de seco. Este procedimento para obtenção da massa de equilíbrio e de seco, foi adotado tendo em vista a garantia de aquisição de melhores resultados e da não-existência de uma norma específica para tais fins (NASCIMENTO, 2002).

A Tabela 3.1 resume todas as condições experimentais usadas por Nascimento (2002) e analisadas nesta pesquisa.

Tabela 3.1 Parâmetros experimentais usados nas simulações numéricas.

Caso	Ar de secagem		Tijolo estrutural			
	T (°C)	UR(%)	Mo (kg/kg, b.s.)	Me (kg/kg, b.s.)	To (°C)	Te (°C)
1	60	10,1	0,101	0,001734	27,94	60
2	80	5	0,214	0,00158	27,42	80

Fonte: Nascimento (2002)

3.4.2 Parâmetros mássico e térmico do produto

Com embasamento em dados reportados por Nascimento (2002) foi realizado cálculos auxiliares, dados os quais foram usados nas simulações numéricas. Tais parâmetros auxiliares são apresentados a seguir:

a) Massa da água

Para obter a quantidade de água no tijolo (m_a) em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de tijolo inicial (m_o) e da massa de tijolo seco (m_s), como mostra a seguir:

$$m_a = m_o - m_s. \quad (3.8)$$

b) Teor de umidade médio em base seca

Para calcular o teor de umidade em base seca do tijolo ($\bar{M}$) foi realizado com base no valor da massa do tijolo no tempo [$m(t)$], e da massa seca do tijolo (m_s), como mostra a seguir:

$$\bar{M} = \frac{m(t) - m_s}{m_s}. \quad (3.9)$$

c) Teor de umidade médio adimensional

Já para calcular o teor de umidade médio adimensional no tijolo ($\bar{M}^*$) foi feito com base no valor do teor de umidade em base seca ($\bar{M}$), do teor de umidade de equilíbrio (M_e) e do teor de umidade inicial (M_o), como mostra a seguir:

$$\bar{M}^* = \frac{\bar{M} - M_e}{M_o - M_e}. \quad (3.10)$$

d) Temperatura adimensional

Para calcular a temperatura adimensional do tijolo (T^*) foi realizado com base no valor da temperatura do tijolo em função do tempo [$T(t)$], da temperatura de equilíbrio (T_e) e da temperatura inicial (T_o), como mostra a seguir:

$$T^* = \frac{T_o - T(t)}{T_o - T_e}. \quad (3.11)$$

Para o domínio em estudo ao qual se refere ao tijolo maciço foi criado inicialmente um material chamado argila cuja as propriedades físico-químicas do ar e do produto estão dispostas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 Propriedades termo físicas do ar e da argila usadas nas simulações.

Propriedades	Ar	Argila
Condutividade térmica k [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	2.61E-02	1.675
Calor específico c_p [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	1,00E+07	1673
Densidade ρ [kg/m^3]	1.185	1985.8

Fonte: Nascimento (2002)

A estimativa do coeficiente de massa foi feita por minimização do erro mínimo entre os dados experimentais e numéricos. A figura 3.3 mostra os coeficientes de difusão utilizados por Nascimento (2002).

Tabela 3.3 Coeficiente de difusão de massa.

Casos	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	D [m^2/s]
1	60	$0,233 \times 10^{-8}$
2	80	$1,296 \times 10^{-8}$

Fonte: Nascimento (2002)

Na Figura. 3.3 está representado o fluxograma que ilustra as principais etapas realizadas no estudo numérico da secagem do tijolo maciço. Para as simulações utilizou-se um computador Intel Core i5 – 8265U 1.80 Ghz e 8 GB de memória RAM e os seguintes aplicativos computacionais: ANSYS ICEM CFD® e ANSYS CFX® 19.2.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CASOS ESTUDADOS

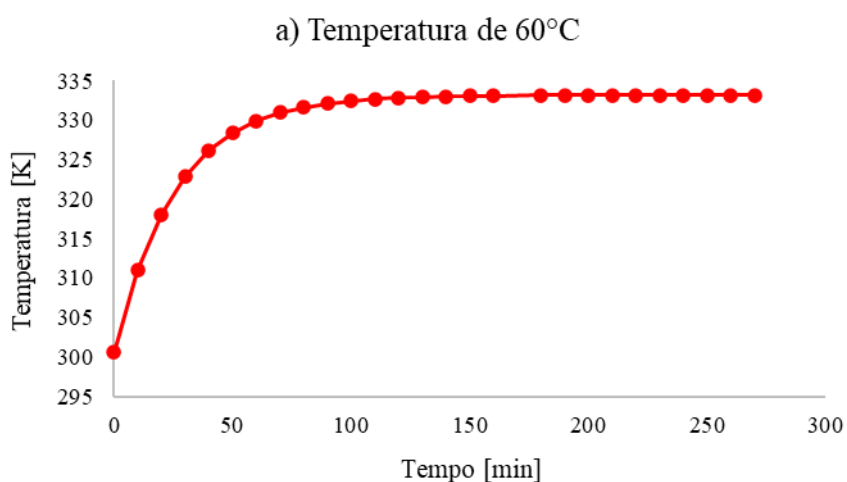
4.1.1 Secagem do tijolo maciço

4.1.1.1 CINÉTICA DE SECAGEM E AQUECIMENTO

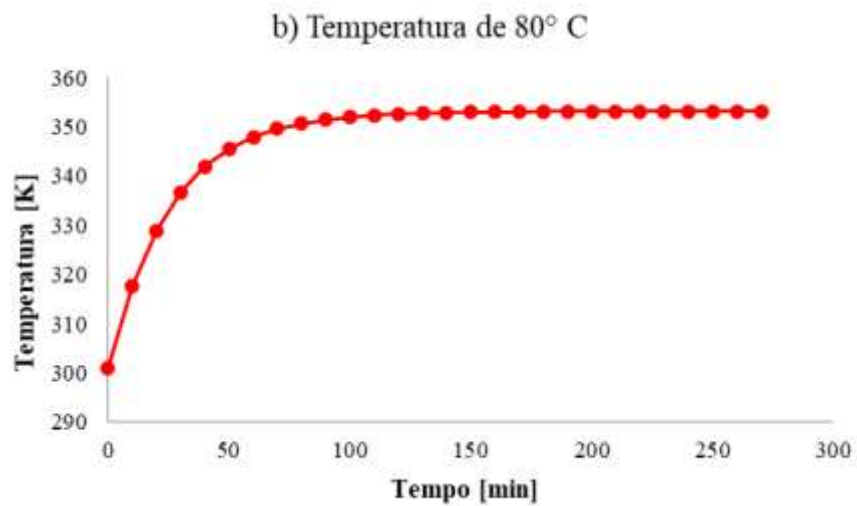
As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram a evolução da temperatura na superfície do tijolo e do teor de umidade médio ao longo do tempo de secagem, à temperatura de 60° e 80°C, respectivamente. Estas figuras indicam que os resultados numéricos da secagem do tijolo maciço se ajustam adequadamente aos dados experimentais reportados por Nascimento (2002), onde podemos perceber uma evolução acentuada da temperatura em pequeno tempo, e logo após fica constante.

Figura 4.1 Temperatura da superfície do tijolo em função do tempo de secagem.

a) $T = 60^{\circ}\text{C}$, UR= 10,1% e b) $T = 80^{\circ}$, UR = 5%.



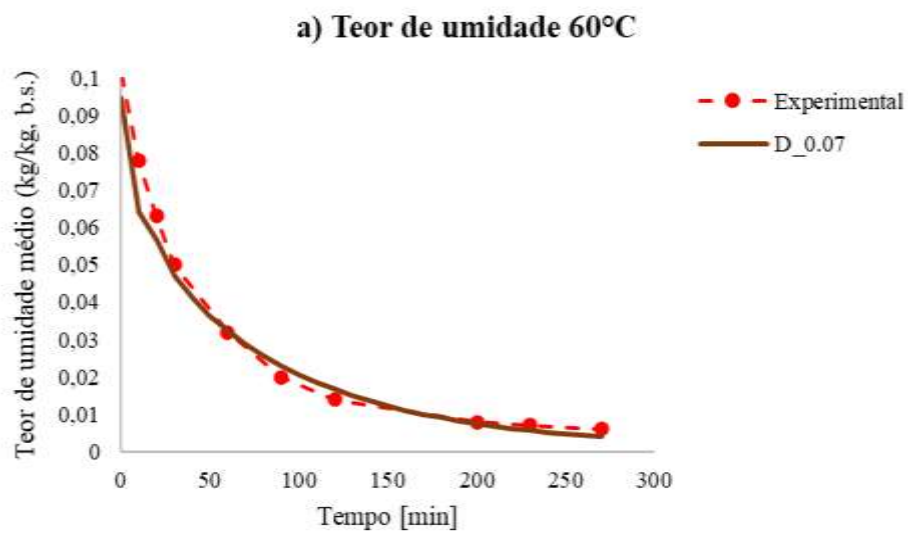
Fonte: Autoral.



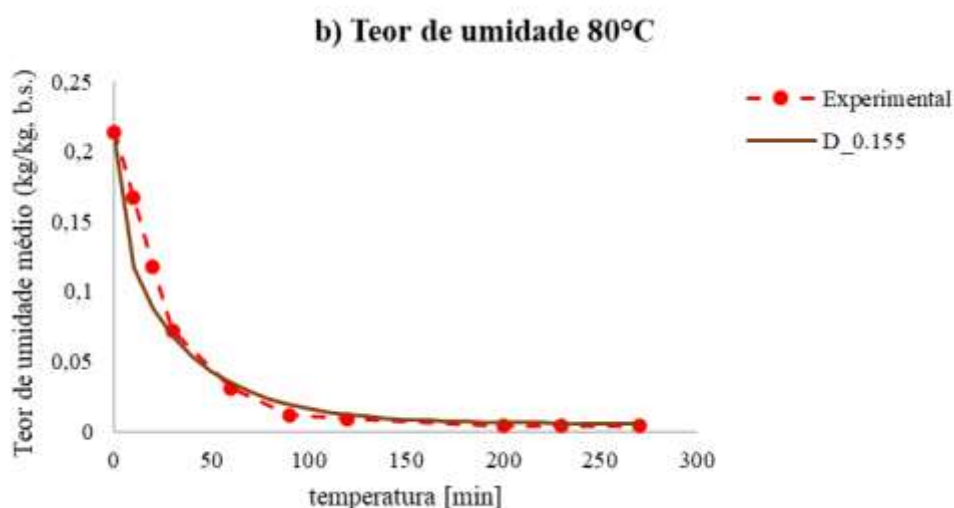
Fonte: Autoral.

Figura 4.2 Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo de secagem.

a) (T = 60°C, UR = 10,1%) e b) (T = 80°C, UR = 5%).



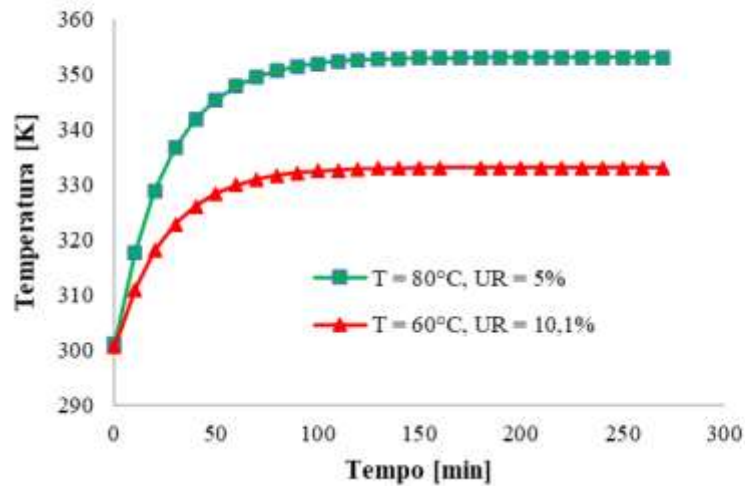
Fonte: Autoral.



Fonte: Autoral.

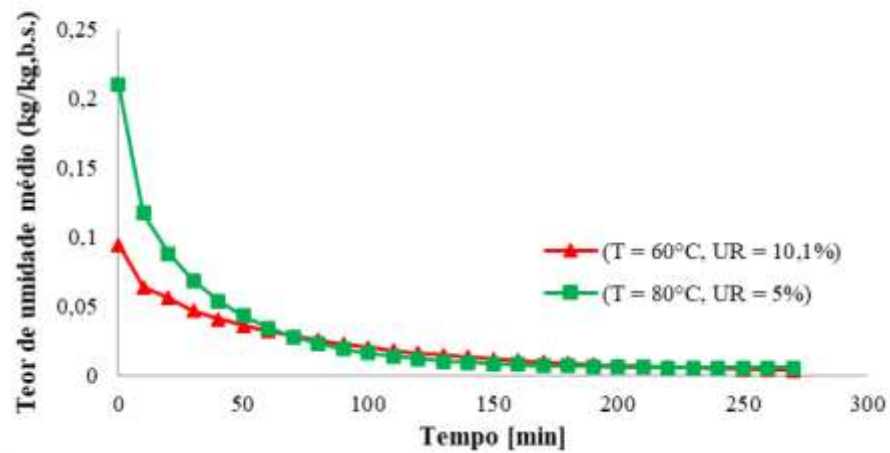
As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram de forma comparativa o estudo realizado com as diferentes temperaturas indicadas na Tabela 4.1. Percebe-se que o aumento da temperatura de secagem influencia acentuadamente o processo de secagem, diminuindo o teor de umidade do tijolo mais rapidamente e, com isto, o tempo de secagem final (NASCIMENTO, 2002). Tal fato ocorre devido ao aumento da disponibilidade de energia para a vaporização da água e da elevação do coeficiente de transferência de massa com o aumento da temperatura de secagem. Em todos os casos estudados, nota-se um bom ajuste entre os resultados numéricos e os dados experimentais. Em adição a isto, os resultados também mostram coerência com o fenômeno físico esperado para o transporte do calor e massa no interior do tijolo, nas situações analisadas.

Figura 4.3 Temperaturas do tijolo em função do tempo no tijolo para diferentes condições de secagem.



Fonte: Autoral.

Figura 4.4 Teor de umidade médio do tijolo em função do tempo para diferentes condições de secagem.



Fonte: Autoral.

A Tabela 4.1 apresenta os diferentes casos simulados, onde estão expostos, os valores do coeficiente de difusão efetivo (D) em função da temperatura para cada caso estudado.

Tabela 4.1 Estudo de casos.

Casos	Temperatura [°C]	D [m ² /s]
1	60	$0,07 \times 10^{-8}$
2	80	$0,155 \times 10^{-8}$

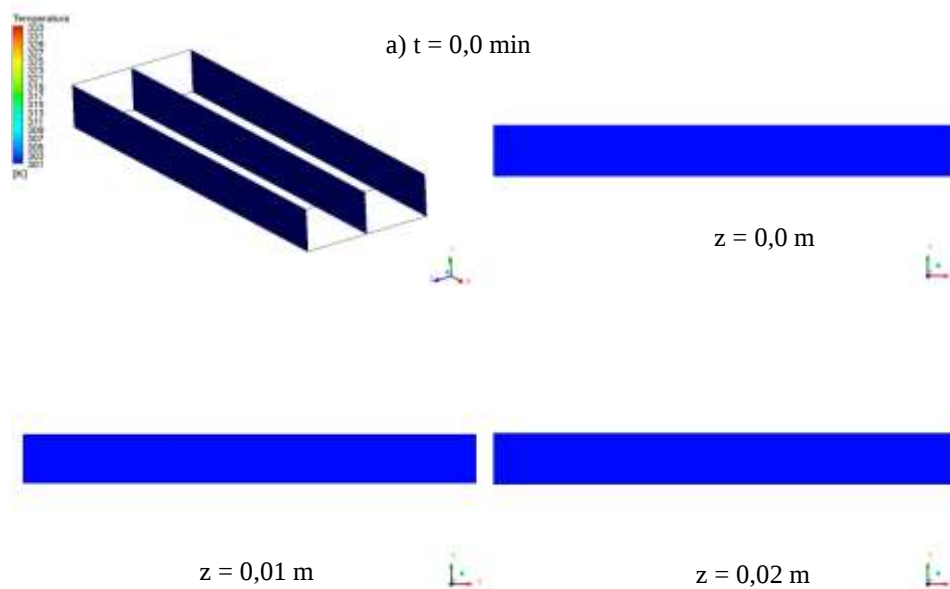
Fonte: Autoral.

4.1.1.2 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA E TEOR DE UMIDADE DO TIJOLO

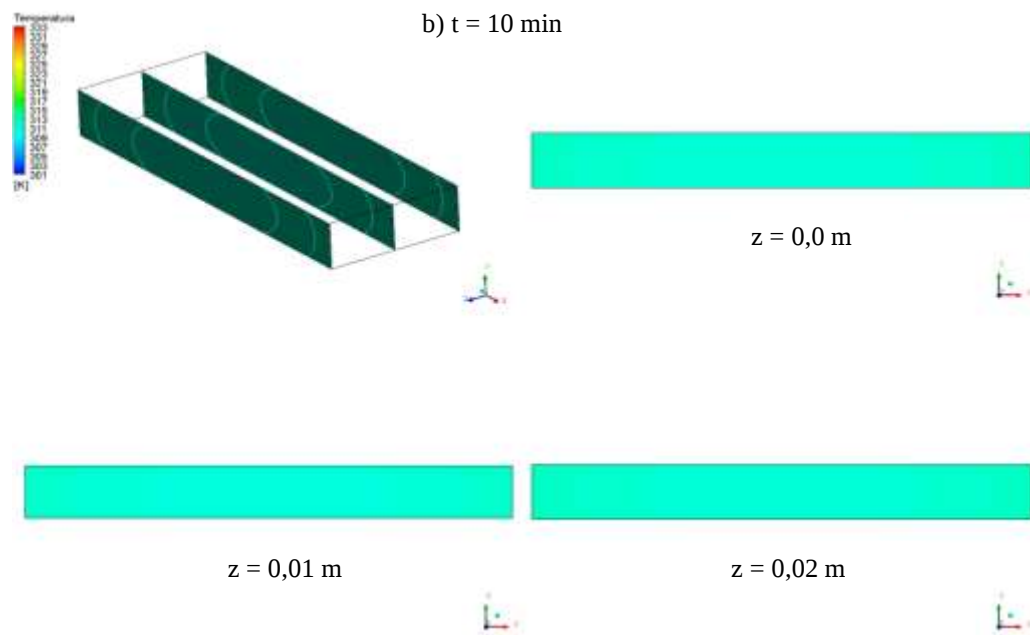
Os resultados apresentados nesta seção estão direcionados à análise dos fenômenos envolvidos durante a secagem do tijolo maciço nas temperaturas de 60 e 80°C. Com objetivo de analisar os comportamentos da temperatura e teor de umidade durante o processo de secagem, foram tomados três planos no eixo xy nas posições 0 m; 0,01 m; 0,02m e no eixo xz, nas posições 0 m; 0,003 m e 0,006 m no tijolo maciço.

Na Figura 4.5, estão ilustrados os campos de temperatura do tijolo sobre os planos XY para os tempos de $t = 0$ e 10 min, para a temperatura de 60°C.

Figura 4.5 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 60°C, nos tempos de secagem de (a) 0 min e (b) 10 min.



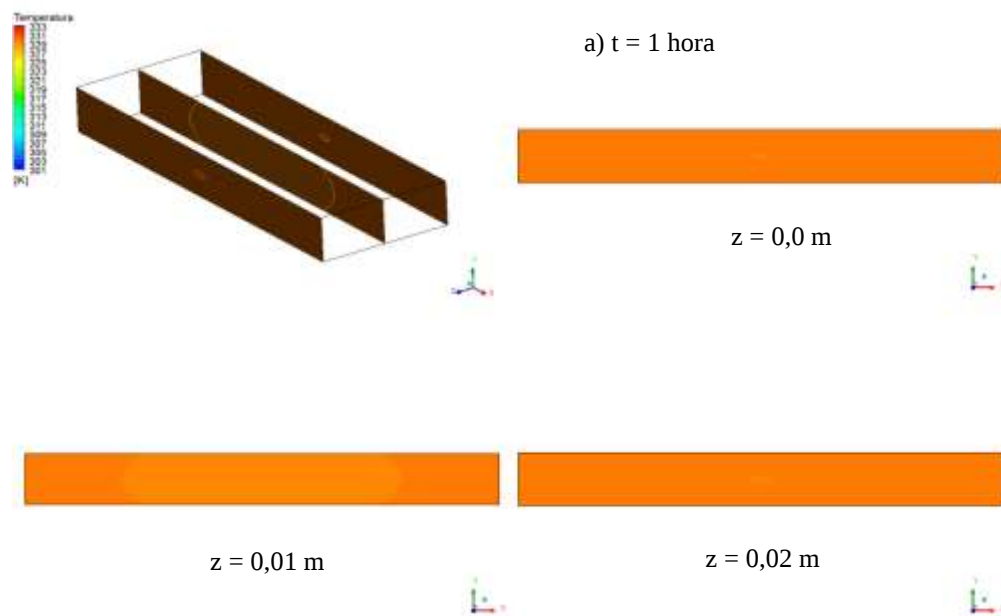
Fonte: Autoral.



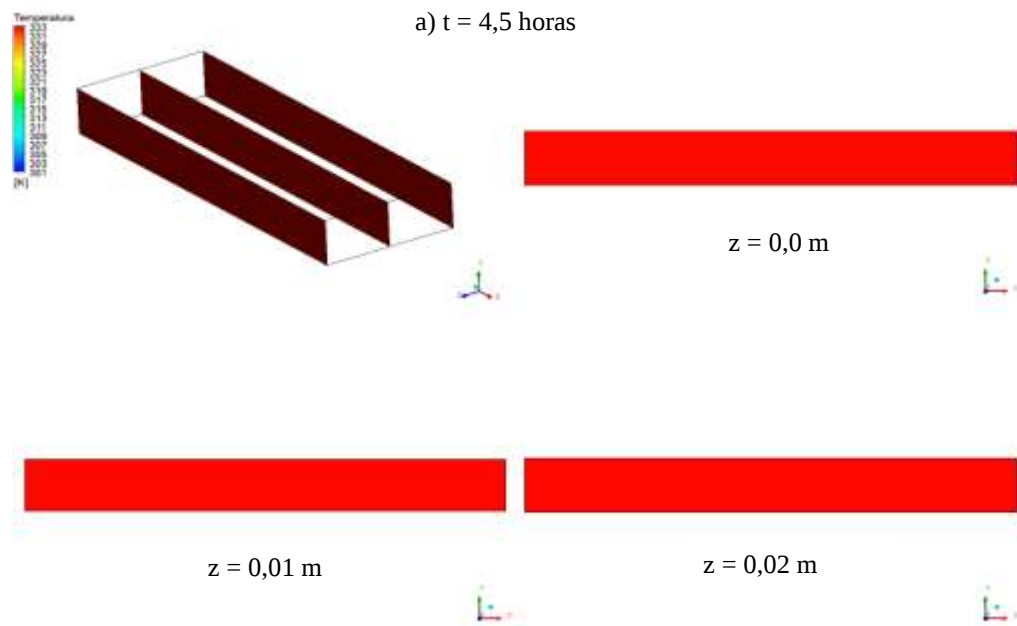
Fonte: Autoral.

Já na Figura 4.6, estão ilustrados os campos de temperatura do tijolo sobre os planos XY para os tempos de $t = 1 \text{ hora}$ e 4,5 horas, para a temperatura de 60°C

Figura 4.6 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 60°C , nos tempos de secagem de (a) 1 hora e (b) 4,5 horas.



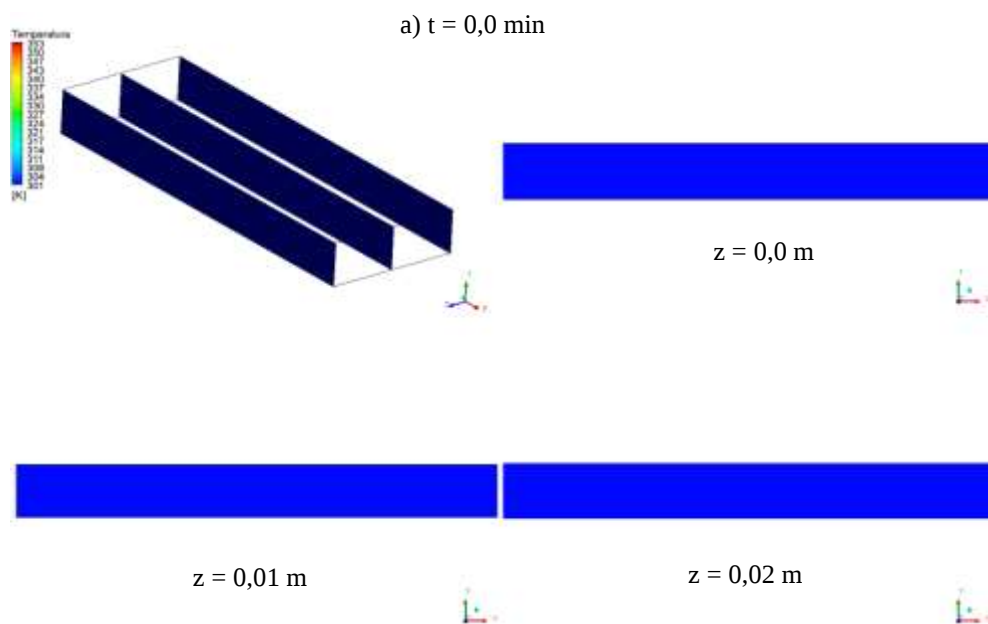
Fonte: Autoral.



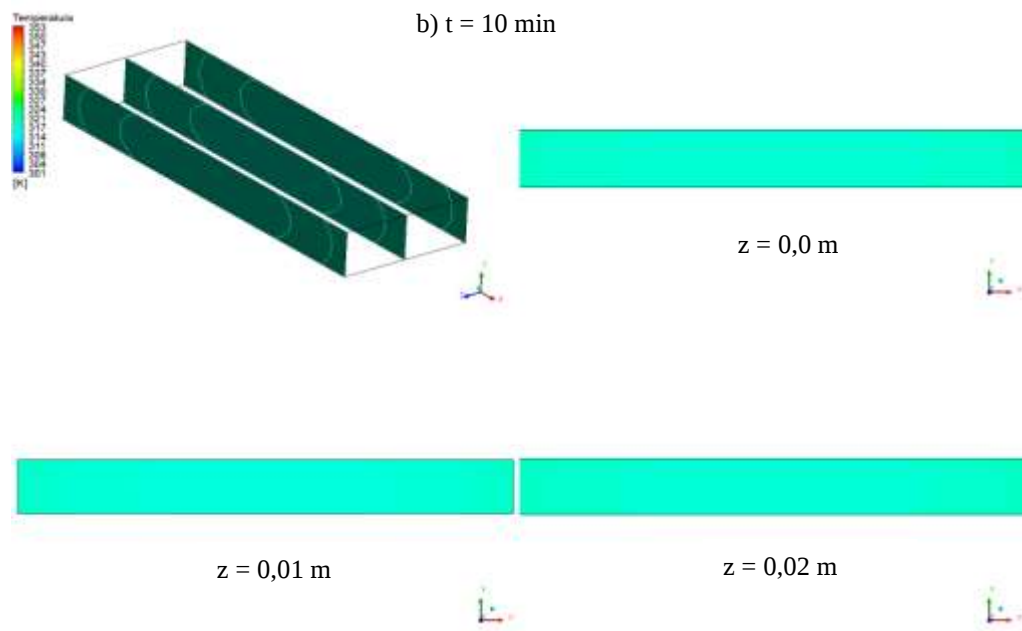
Fonte: Autoral.

Na Figura 4.7 estão ilustrados os campos de temperatura do tijolo sobre os planos XY para os instantes $t = 0$ e 10 minutos, para a temperatura de 80°C .

Figura 4.7 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 80°C , nos tempos de secagem de (a) 0 min e (b) 10 min.



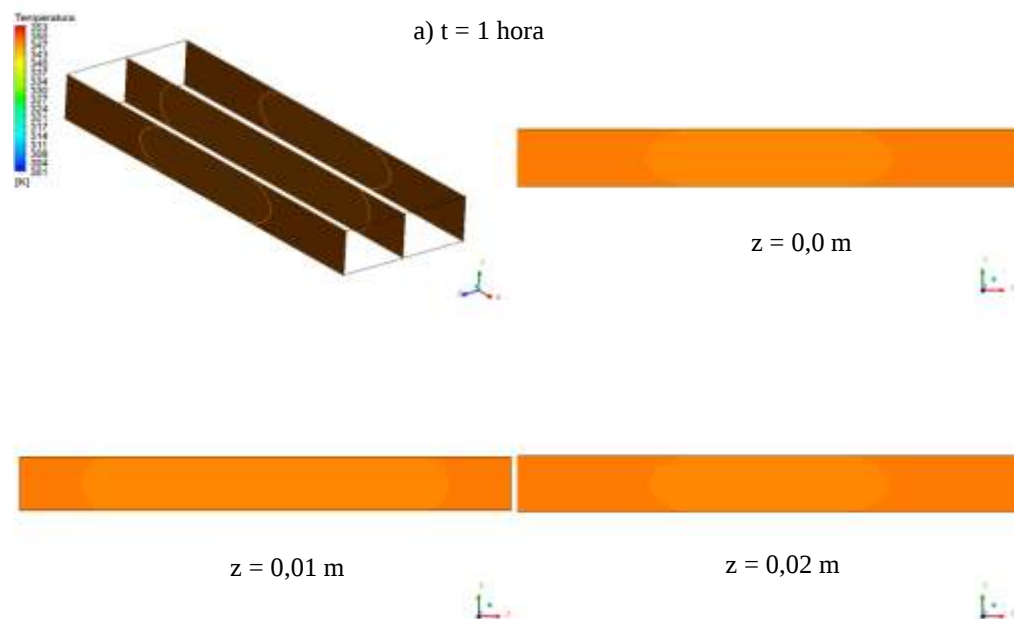
Fonte: Autoral.



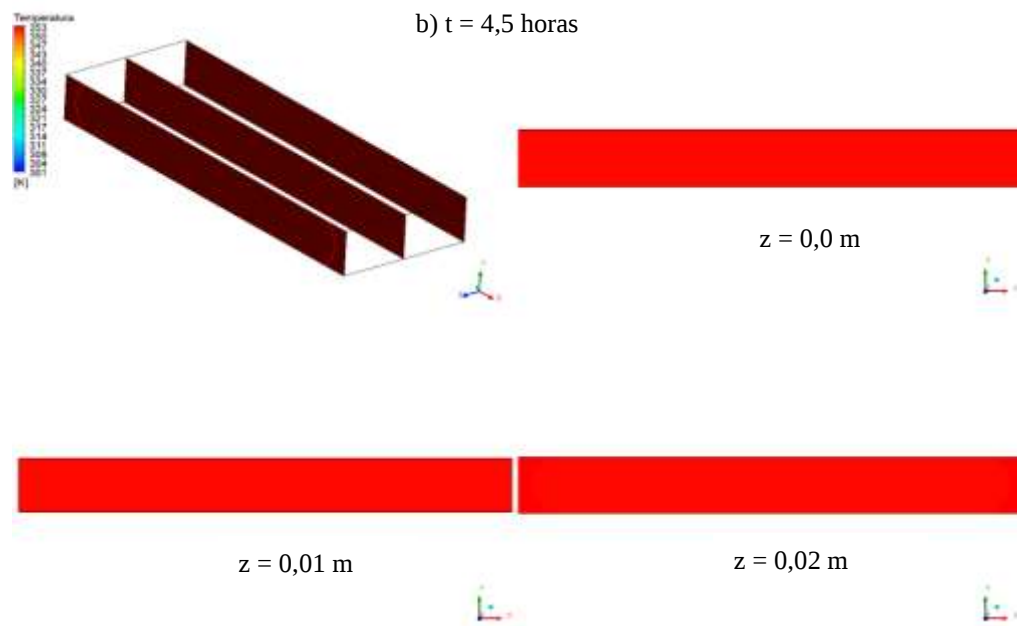
Fonte: Autoral.

Na Figura 4.8, ilustra os campos de temperatura do tijolo sobre os planos XY para os tempos de $t = 1 \text{ hora}$ e $4,5 \text{ horas}$, para a temperatura de 80°C .

Figura 4.8 Distribuição de temperatura no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 80°C , nos tempos de secagem de (a) 1 hora e (b) 4,5 horas.



Fonte: Autoral.



Fonte: Autoral.

Diante das imagens apresentadas podemos verificar que, os gradientes de temperatura estão localizados na região próxima ao vértice do sólido em todos os casos ilustrados, uma vez que estão em contato com o ar de secagem. Estas regiões são mais susceptíveis ao aparecimento de defeitos na peça, que concordam com a afirmação reportada por Nascimento (2002). Contudo, nesta análise, verifica-se uma uniformidade aparente de temperatura no interior do tijolo, decorrente de um aquecimento mais lento ($h = 1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$).

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

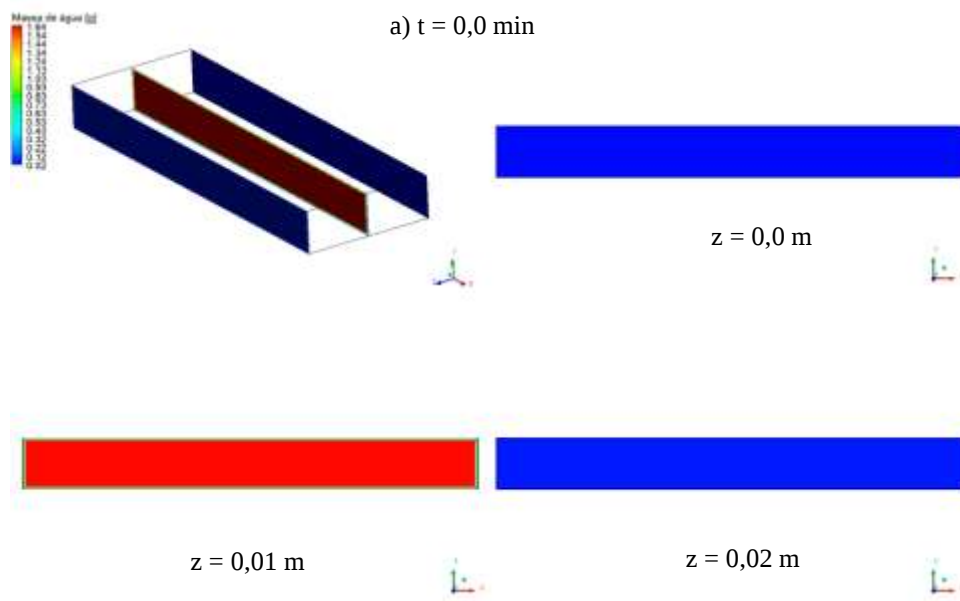
Dessa forma, podemos ver que é de grande importância que haja uma secagem prévia, onde seja controlada e uniforme. Mas, este procedimento não pode ser de maneira lenta, pois pode se tornar antieconômico. Assim, alguns fatores como a pressão do ar, umidade relativa, temperatura, dimensões e massa específica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

Agora iremos analisar os resultados voltados ao teor de umidade para as temperaturas de 60°C e 80°C , nos instantes de tempo para 0, 10 min, 1 hora e 4,5 horas. Vale ressaltar, que, foi considerado como condição de contorno prescrita uma umidade de equilíbrio igual a

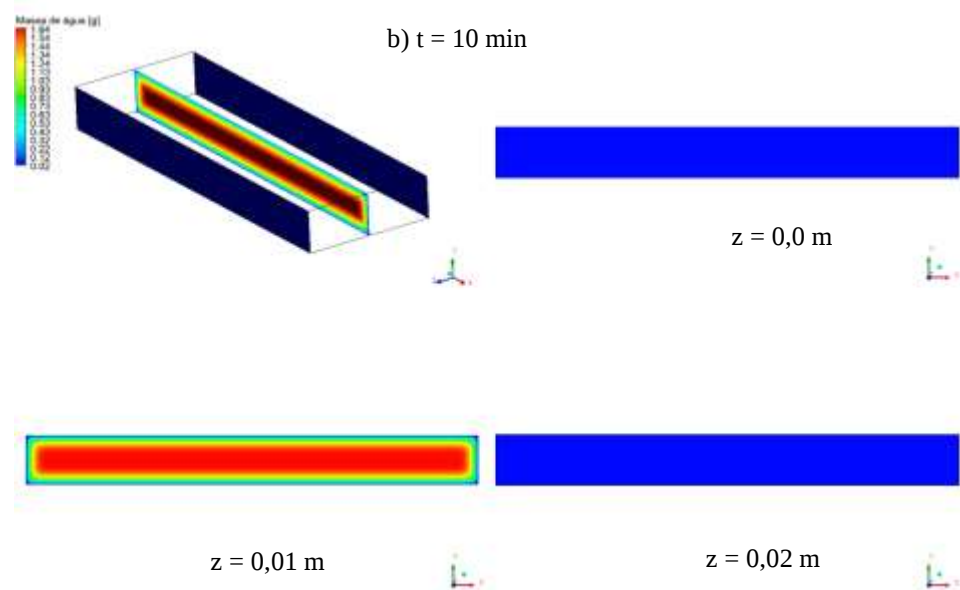
0,001734 (kg/kg, b.s) para 60°C e 0,00158 (kg/kg, b.s) para 80°C, sobre todas as faces do tijolo, que é equivalente a uma condição de equilíbrio higroscópico instantâneo.

Na Figura 4.9 apresentam-se os campos de teor de umidade sobre os planos XY para os instantes $t = 0,0$ e 10 minutos, para a temperatura de 60°C.

Figura 4.9 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 60°C, nos tempos de secagem de a) 0,0 min e b) 10 min.



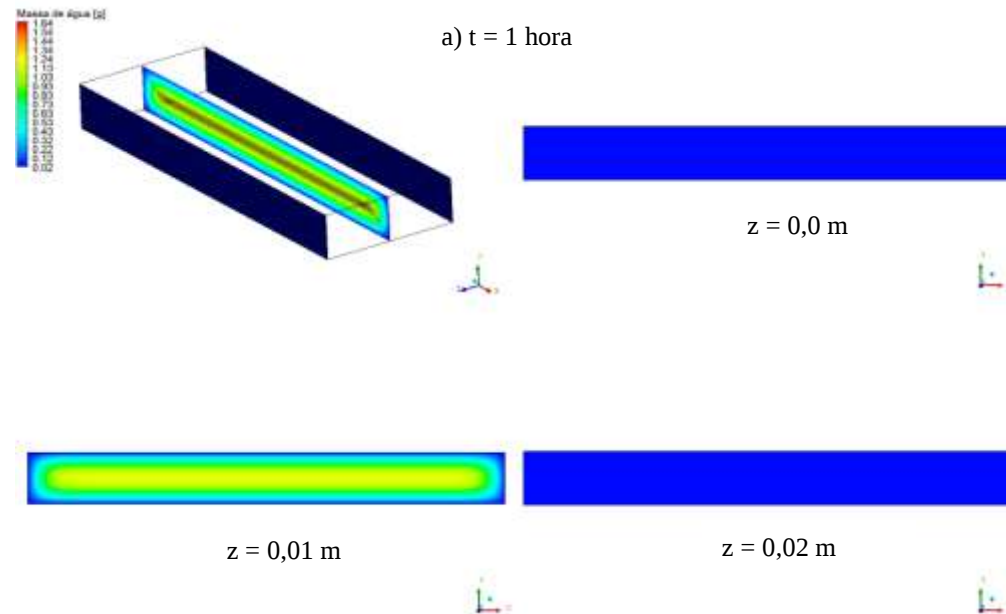
Fonte: Autoral.



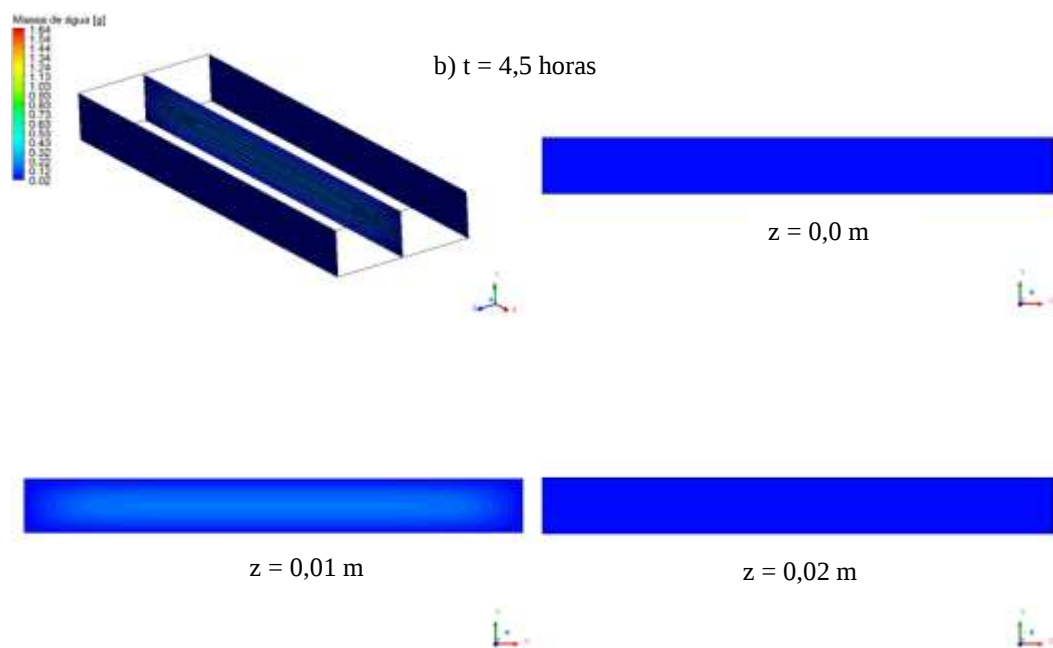
Fonte: Autoral.

Na Figura 4.10 apresentam-se os campos de teor de umidade sobre os planos XY para os tempos de $t = 1$ hora e $t = 4,5$ horas, para a temperatura de 60°C .

Figura 4.10 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 60°C , nos tempos de secagem de a) 1 hora e b) 4,5 horas.



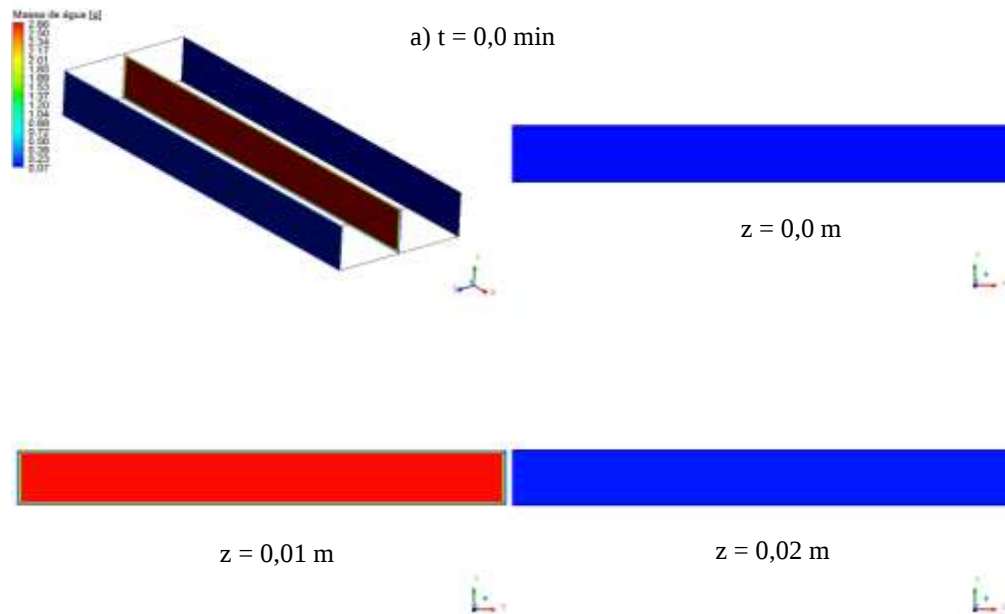
Fonte: Autoral.



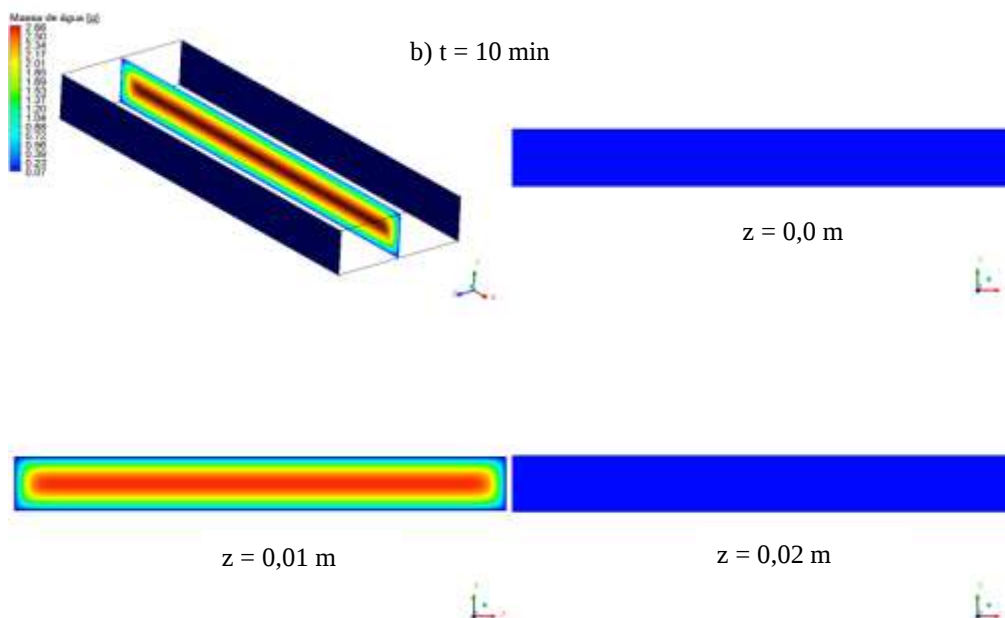
Fonte: Autoral.

Na Figura 4.11 apresentam-se os campos de teor de umidade sobre os planos XY para os instantes $t = 0,0$ e 10 minutos, para a temperatura de 80°C .

Figura 4.11 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 80°C , nos tempos de secagem de a) 0,0 min e b) 10 min.



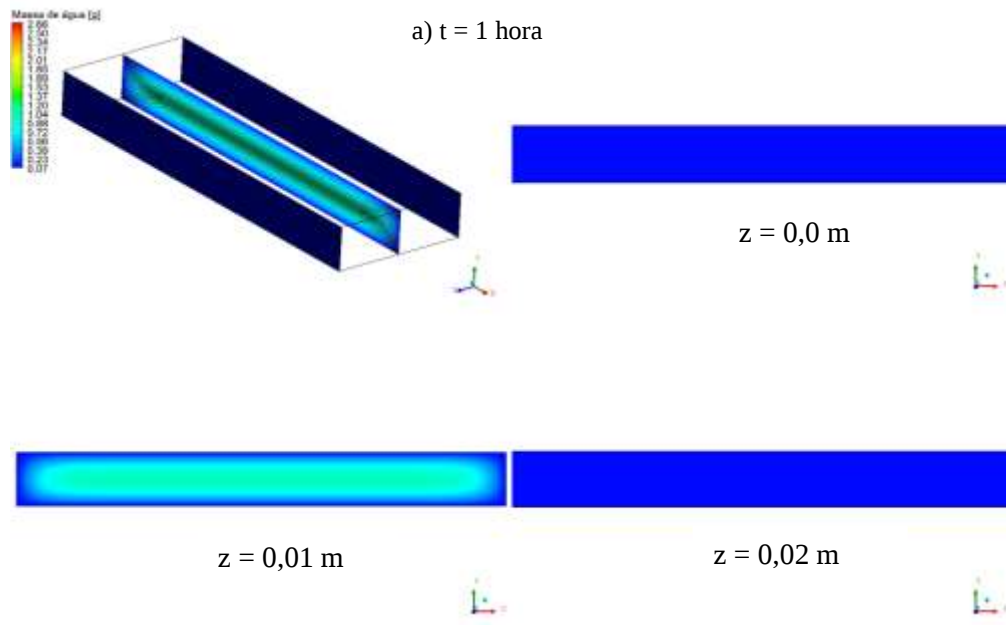
Fonte: Autoral.



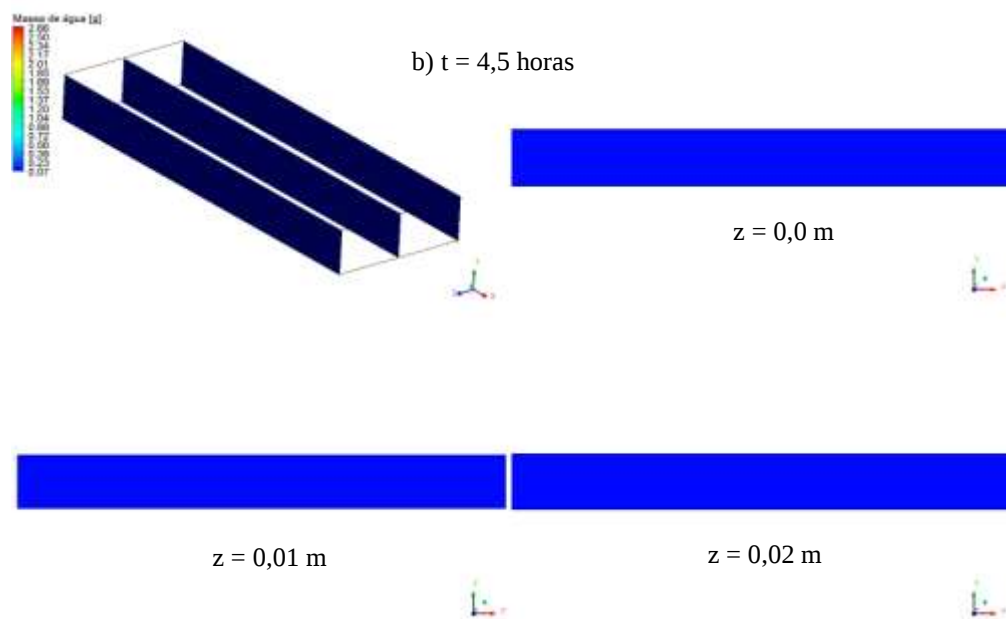
Fonte: Autoral.

Figura 4.12 apresentam-se os campos de teor de umidade sobre os planos XY para os tempos de $t = 1$ hora e $t = 4,5$ horas, para a temperatura de 80°C .

Figura 4.12 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XY para a temperatura de 80°C , nos tempos de secagem de a) 1 hora e b) 4,5 horas.



Fonte: Autoral.



Fonte: Autoral.

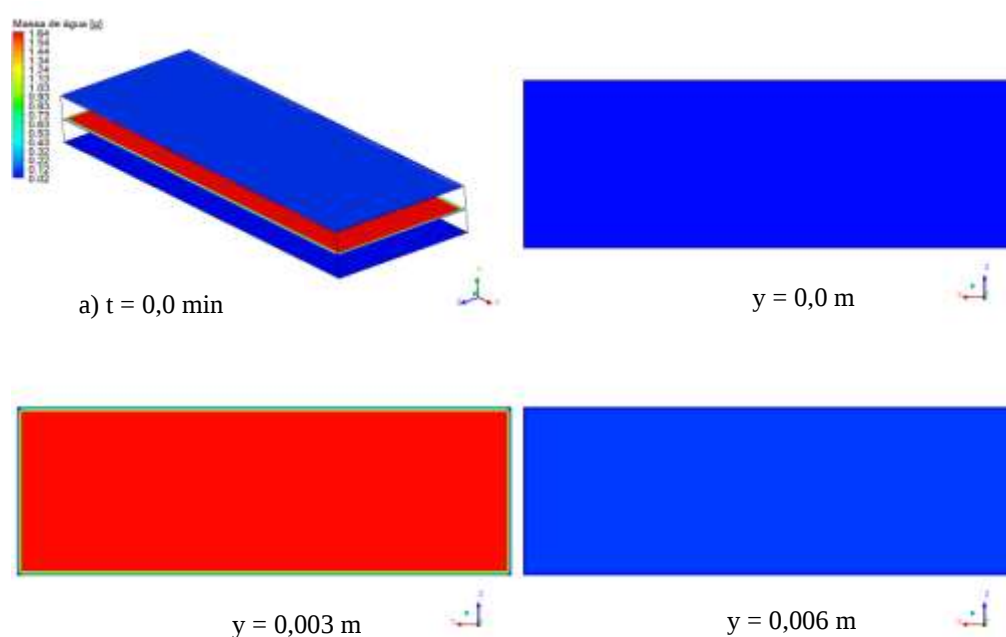
Observa-se que os maiores gradientes de umidade na região próxima ao vértice do sólido em todos os tempos ilustrados, devido ao fato de que esta região está em contato mais intenso com o ar de secagem. O teor de umidade, apresenta os maiores resultados no centro do mesmo em qualquer tempo. Percebe-se também o decréscimo do teor de umidade com o tempo, em qualquer posição, tendendo para o seu teor de umidade de equilíbrio, para tempos de secagem suficientemente longos.

Devido à temperatura na parede ser maior do que a temperatura no interior do tijolo, o fluxo de calor ocorre da superfície para o centro do tijolo, e o oposto para o fluxo de massa. Estes fenômenos acoplados podem gerar elevadas tensões no interior do tijolo, dando oportunidade ao surgimento de trincas, rachaduras e deformações. Tais defeitos, gerados pelos gradientes de umidade e temperatura, podem provocar tensões de tração e compressão, não aceitáveis, que reduzem drasticamente a qualidade do produto no final do processo (Silva, 2018).

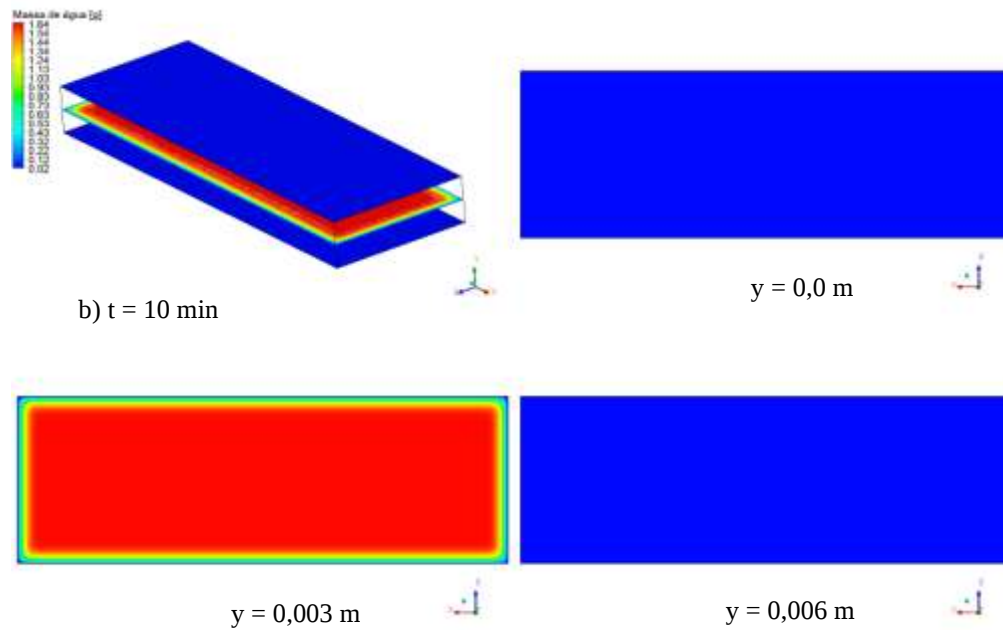
A seguir serão mostrados os campos de teor de umidade considerando os mesmos parâmetros apresentado acima, porém no plano xz.

Na Figura 4.13 apresentam-se os campos de teor de umidade sobre os planos XZ para os instantes $t = 0,0$ e 10 minutos, para a temperatura de 60°C

Figura 4.13 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ para a temperatura de 60°C , nos tempos de secagem de a) 0,0 min e b) 10 min.



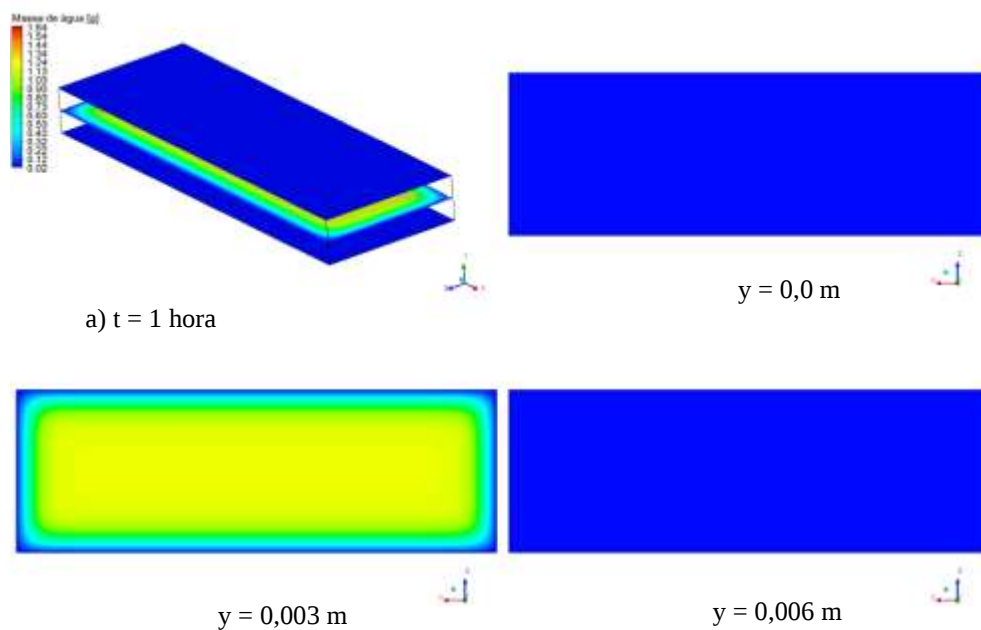
Fonte: Autoral.



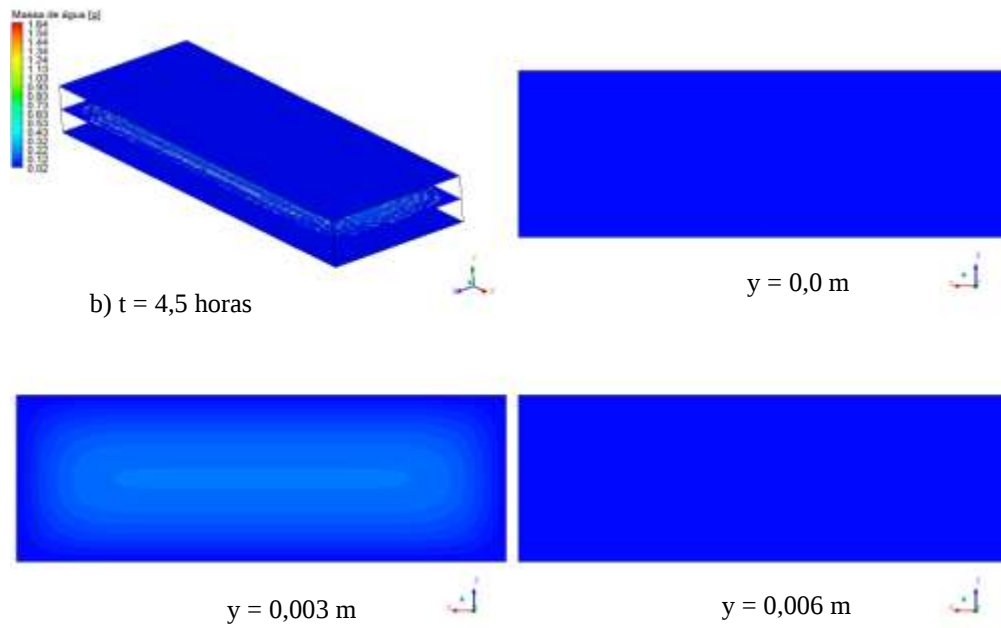
Fonte: Autoral.

Na Figura 4.14 apresentam-se os campos de teor de umidade sobre os planos XZ para os tempos de $t = 1 \text{ hora}$ e $t = 4,5 \text{ horas}$, para a temperatura de 60°C .

Figura 4.14 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ para a temperatura de 60°C , nos tempos de secagem de a) 1 hora e b) 4,5 horas.



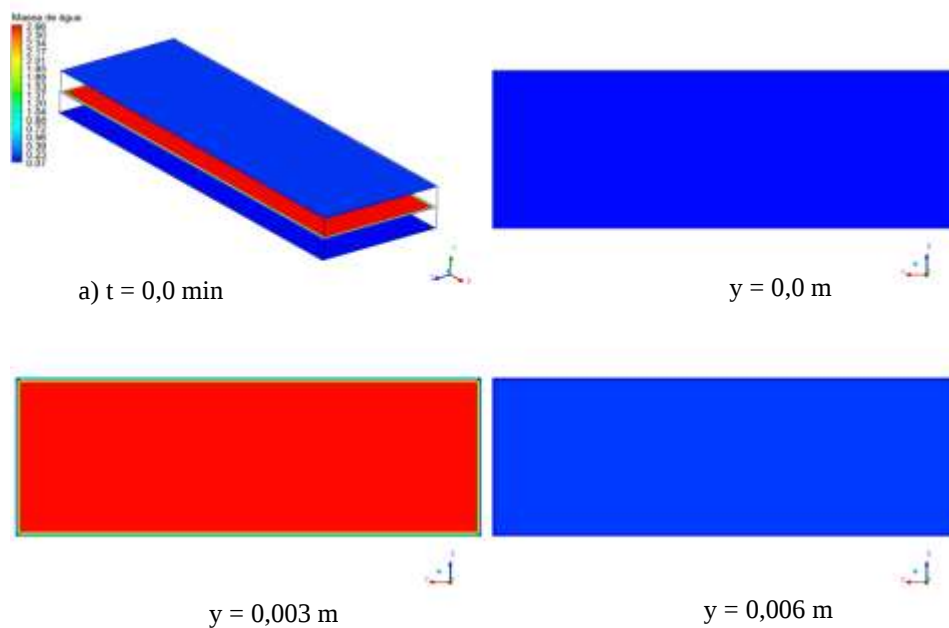
Fonte: Autoral.



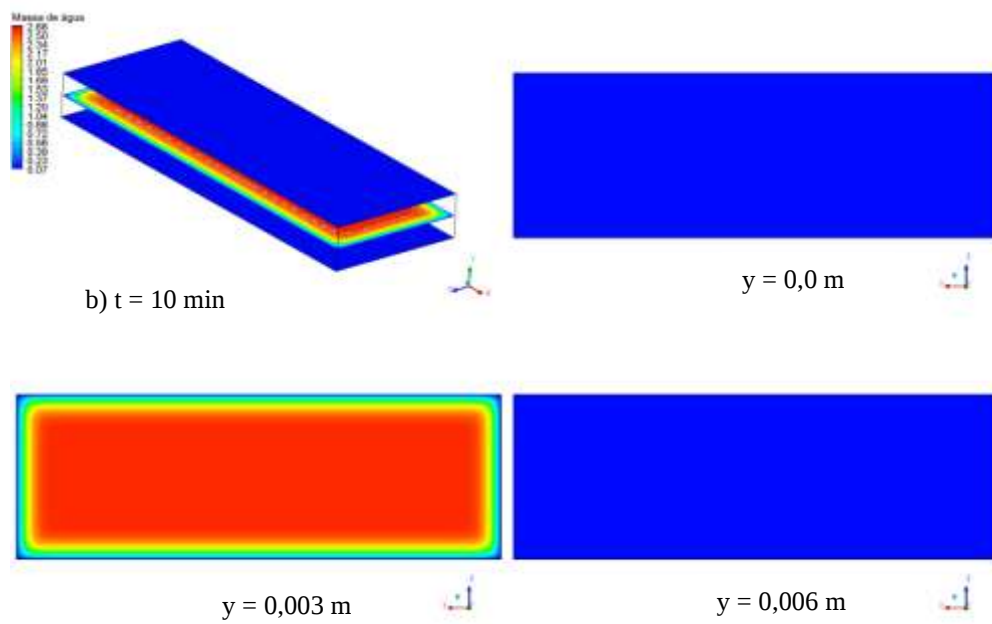
Fonte: Autoral.

Na Figura 4.15 apresentam-se os campos de teor de umidade sobre os planos XZ para os instantes $t = 0,0$ e 10 minutos, para a temperatura de 80°C

Figura 4.15 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ para a temperatura de 80°C , nos tempos de secagem de a) 0,0 min e b) 10 min.



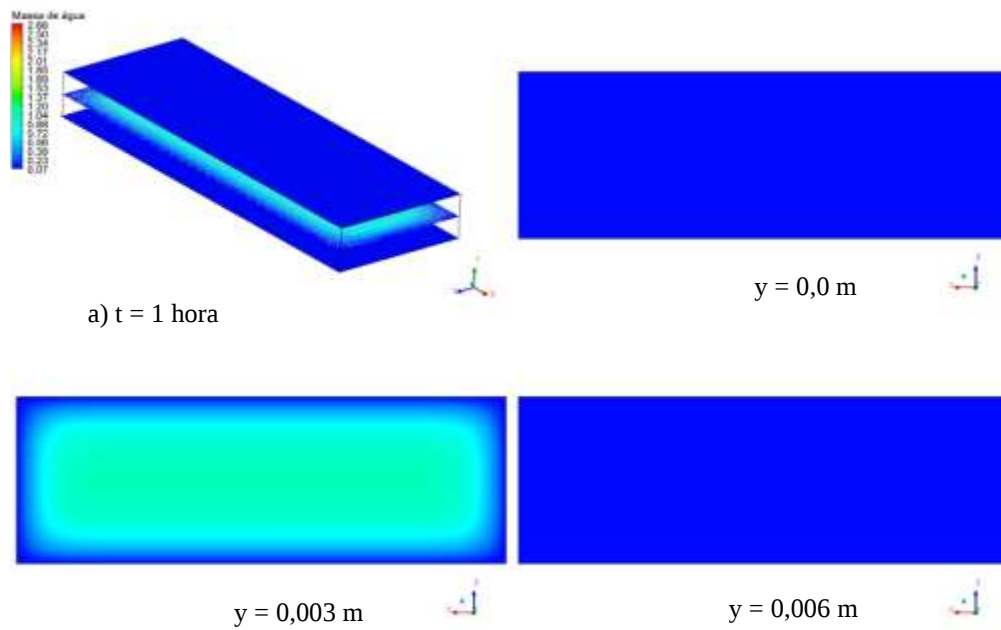
Fonte: Autoral.



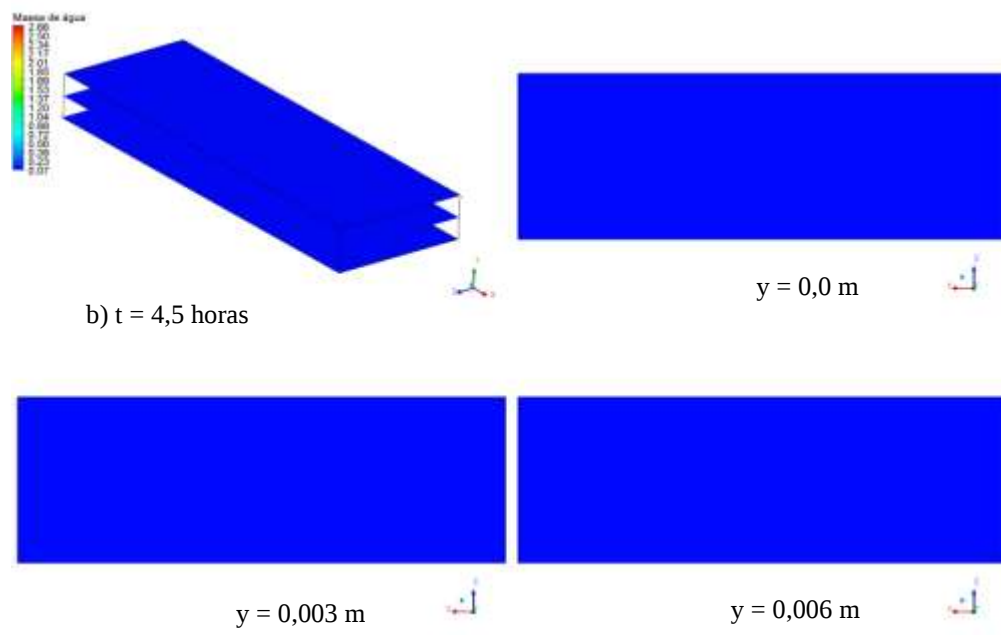
Fonte: Autoral.

Na Figura 4.16 apresentam-se os campos de teor de umidade sobre os planos XZ para os tempos de $t = 1 \text{ hora}$ e $t = 4,5 \text{ horas}$, para a temperatura de 80°C .

Figura 4.16 Distribuição do teor de umidade no interior do tijolo em diferentes planos XZ para a temperatura de 80°C , nos tempos de secagem de a) 1 hora e b) 4,5 horas.



Fonte: Autoral.



Fonte: Autoral.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 CONCLUSÕES

Diante dos dados obtidos para a secagem do tijolo maciço, pode-se concluir que:

- A modelagem matemática proposta foi adequada, e os resultados numéricos da temperatura do tijolo e da massa de água perdida apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais;
- Quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais rápidas são as taxas de aquecimento e de secagem;
- Constatam-se boa aproximação entre as curvas referentes aos dados experimentais e numéricos, do teor de umidade médio e temperatura superficial viabilizando a utilização do programa computacional aplicado;
- A modelagem matemática utilizada mostra-se adequada e generalizada, podendo ser utilizada para a obtenção de soluções em casos de secagem, resfriamento, aquecimento e umidificação;
- Os campos de umidade e temperatura permitem verificar as regiões de gradientes mais altos, as quais são as regiões onde há maior probabilidade de ocorrência de trincas e deformações, que podem reduzir a qualidade do produto após o processo de secagem;
- Sob o ponto de vista de transferência de calor e/ou massa, os gradientes de umidade e temperatura são maiores nos planos superficiais e nos vértices do sólido, que está em contato direto com o ar de secagem. Sendo assim, tais regiões são mais susceptíveis à ocorrência de choques térmicos, trincas e deformações, que comprometem a qualidade do produto obtido.

5.2 Sugestões para futuras pesquisas

Com o objetivo de aprimorar a discussão do tema, sugere-se alguns tópicos para serem abordados em trabalhos futuros.

- Desenvolver um modelo com malha móvel para levar em conta o efeito de encolhimento do meio poroso;
- Efetuar simulações numéricas com outras temperaturas, para ampliar a análise;
- Estudar a secagem do tijolo cerâmico considerando propriedades termofísicas e de massa variáveis;
- Aplicar a modelagem matemática em outros meios de secagem, como por exemplo em estufas e em materiais com diferentes composições químicas.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM. **Informações Técnicas - Processos De Fabricação**. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso realizado em 02/03/2021.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR- 7170: Resistência mínima à compressão em relação à categoria**. Rio de Janeiro, p. 02-04. 1983.
- ALIBABA. 2021. Secador artificial de tijolos. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com>. Acesso em 16/04/2021.
- ALMEIDA, G. S. **Transferência de calor e massa em sólidos heterogêneos com geometria arbitrária: uma análise concentrada**. 2003. p. 52. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
- ALMEIDA, Genival da SILVA. **Simulação e experimentação de secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais**. 2009. 209 f. Tese (Doutorado em engenharia de processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- ANFACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento). **História da cerâmica**. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/historia-da-ceramica>. Acesso realizado em 05/01/2021.
- ANICER (Associação Nacional da Industria Cerâmica). **Dados do setor**. 2014. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>. Acesso realizado em 17/02/2021.
- ARAÚJO, M. V.; DELGADO, J.M.P.Q.; LIMA, A.G.B. **On the use of CFD in thermal analysis of industrial hollow ceramic brick**. *Diffusion Foundations*, v. 10, p. 70-82, 2017.
- ARAÚJO, Morgana de Vasconcellos. **Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos industriais**. 2019. 239 f. Tese (Doutorado em engenharia de processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.
- BELA VISTA TIJOLOS. 2021. Processo de fabricação do tijolo. Disponível em: <http://www.belavistatijolos.com.br/processo.html>. Acesso realizado em 15/04/2021.
- BRANCO, P. M. **Minerais Argilosos**. Serviço Geológico do Brasil. São Paulo, 18 ago. 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Minerais-Argilosos-1255.html>. Acesso realizado em 15/01/2020.

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

CYBERSPACEANDTIME.2021. **Corte do tijolo** Disponível em: <http://cyberspaceandtime.com/9UsOZGgDLn8.video+related>. Acesso realizado em 16/04/2021.

DESTERRO CONSTRUÇÕES.2021. Armazenagem de tijolos maciço. Disponível em: <https://www.asterroconstrucoes.com.br/blog/construcao/o-que-sao-tijolos/>. Acesso realizado em 15/02/2021.

GUIDUGLI CONSTRUÇÃO E ACABAMENTO. 2021.Tijolo vermelho. Disponível em: <https://www.guidugli.com.br/tijolo-a-vista-vermelho>. Acesso realizado em 20/02/2021.

ICEMEG, Equipamentos Metalúrgicos. Fornos cerâmicos. Disponível em: <http://www.icmeg.com.br/fc.php>. Acesso em: 15/02/2021.

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

KAWAGTJTI, W. ML **Estudo do comportamento termico de fornos intermitentes tipo "paulistinha" utilizados na industria de ceramica vermelha.** 2004. 87 p. Dissertacao (Mestrado em Engenharia Mecanica), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina,2004.

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.

MAFRA, A. T. **Proposta de Indicadores para a indústria de cerâmica vermelha.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 1999.

MEDEIROS, M.H.F.; SOUZA, D.J.; FILHO, J.H.; ADORNO, C.S.; QUARCIONI, V.A.; PEREIRA, E. **Resíduo de cerâmica vermelha e filer calcário em compósito de cimento**

Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-sílica. Revista Matéria, v. 21, n. 2, p. 282 – 300, 2016.

MENDONÇA, F; KOZEL, S. (Org). **Elementos de epistemologia da geografia contemporânea.** Curitiba: UFPR, 2002.

NASCIMENTO, C. F. **Materiais cerâmicos: teoria e aplicação.**2007. Apostila – Centro Federal de Edificação Tecnológica do Maranhão. São Luis, 2007.

NASCIMENTO, José Jefferson da Silva. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: Secagem de materiais cerâmicos.** 2002. 208 f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.

OLIVEIRA, M. C; BERNILS, M. F. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas brancas e de revestimentos** - São Paulo: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006, 90p (série P+L).

PAULETTI, M. C. **Modelo para introdução de nova tecnologia em agrupamentos de micro e pequenas empresas: estudo de caso das indústrias de cerâmica vermelha no Vale do Rio Tijucas.** 2001.Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pósgraduação em engenharia de produção, Florianópolis, 2001.

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

SANTOS, J. P. S. **Secagem de Materiais Cerâmicos com Forma Complexa: Um Estudo Teórico Via CFX.** 2018. 103 p. Tese (Pós-Graduação em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2018.

SANTOS, R. S. **Estudo do Processo de Secagem de Blocos Cerâmicos Estruturais: Modelagem e Simulação.** 2019. 215 p. Tese (Pós-Graduação em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2019.

SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas). **Cerâmica Vermelha.** Estudos de Mercado SEBRAE /ESPM – Relatório Completo, Sebrae Nacional, São Paulo, 2008.

SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas). **Cerâmica vermelha.** Boletim de Inteligência da Construção Civil, Sebrae Nacional, São Paulo, 2015.

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

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

SILVA, Joselito Barbosa. **Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados.** 2009. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

SILVA, S. **Como fazer argila caseira.** 2017. Disponível em: <https://artes.umcomo.com.br/artigo/como-fazer-argila-caseira-11299.htm>. Acesso realizado em 06/02/2021.

SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste) e ITEP (Instituto Técnico-Científico de Perícia). **Conservação de energia do setor industrial: cerâmica estrutural.** Recife, 1996.

VILLAR, V. S. **Perfil e perspectivas da indústria de cerâmica vermelha do Sul de Santa Catarina.** 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.