



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO QUÍMICA
QUÍMICA INDUSTRIAL**

ALANNA COSTA DE SOUSA

**INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DE TIJOLOS CERÂMICOS INDUSTRIAIS
VAZADOS NA CINÉTICA DE SECAGEM VIA CFD**

**CAMPINA GRANDE
2021**

ALANNA COSTA DE SOUSA

**INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DE TIJOLOS CERÂMICOS INDUSTRIAIS
VAZADOS NA CINÉTICA DE SECAGEM VIA CFD**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba- UEPB.

Área de concentração: secagem.

Orientadora: Dra. Marcia Ramos Luiz

Coorientadora: Dra. Morgana de Vasconcellos Araújo

**CAMPINA GRANDE
2021**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S725i Sousa, Alanna Costa de.
Influência da posição de tijolos cerâmicos industriais vazados na cinética de secagem via CFD [manuscrito] / Alanna Costa de Sousa. - 2021.
71 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.

"Orientação : Profa. Dra. Marcia Ramos Luiz, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Desumidificação. 2. CFD. 3. Termofísica. 4. Materiais cerâmicos. I. Título

21. ed. CDD 666

ALANNA COSTA DE SOUSA

INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DE TIJOLOS CERÂMICOS INDUSTRIAIS
VAZADOS NA CINÉTICA DE SECAGEM VIA CFD

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como exigência para a
obtenção do título de Bacharel em Química
Industrial da Universidade Estadual da
Paraíba- UEPB.

Área de concentração: secagem.

Aprovada em: 04/06/2021.

BANCA EXAMINADORA

Márcia Ramos Luiz

Profa. Dra. Marcia Ramos Luiz (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Morgana de Vasconcellos Araújo

Dra. Morgana de Vasconcellos Araújo (Coorientadora)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Maria da Conceição de S. Machado

Profa. Me. Maria da Conceição da Nóbrega
Machado Universidade Estadual da Paraíba
(UEPB)

Maristela Alves da Silva

Profa. Dra. Maristela Alves da Silva
Universidade Estadual da Paraíba
(UEPB)

Á Deus por ser essencial em minha vida, autor do meu destino, meu guia, por ter dado a mim toda a sabedoria e discernimento necessário durante toda esta caminhada. Á minha família e amigos, por estarem ao meu lado em todos os momentos, por toda compreensão, paciência e apoio para chegar diante da conclusão de mais uma etapa em minha vida. DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pois sem ele eu não teria traçado o meu caminho e feito a minha escolha pela Química.

Gostaria de agradecer e dedicar essa dissertação à minha mãe Ana Lúcia, meu pai Josemar (*in memoriam*), meus irmãos Aline e Anderson e minha avó Elita.

Agradeço à professora Morgana de Vasconcellos Araújo, que contribuiu ao longo da graduação, por meio das disciplinas e debates, para o desenvolvimento desta pesquisa e o despertar para o interesse pela área computacional.

Agradeço à minha orientadora Márcia Ramos Luiz por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa.

À banca examinadora pelas contribuições sugeridas.

A meus colegas de classe que foram verdadeiros e companheiros, em especial à Maria Barbosa, Niedja, Andreando, Gizely e Joana. Esses têm grande parcela de contribuição na minha graduação e sempre serei muito grata por isso.

Também quero agradecer à Universidade Estadual da Paraíba e a seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino.

RESUMO

Os materiais cerâmicos são construídos a partir de matérias-primas naturais ou sintéticas. O processo de fabricação do tijolo cerâmico, após a matéria-prima ser retirada de jazidas, passa por tratamentos prévios como a homogeneização, etapas de conformação do material, secagem e queima. A secagem é a fase que precisa maior cuidado, pois garantirá a remoção de toda a umidade afim de preservar a qualidade do produto. A simulação por meio de modelo matemático é utilizada para representar dados experimentais. Este trabalho tem como objetivo prever o fenômeno de transferência de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos através de modelos matemáticos. Considerando as propriedades termofísicas constantes, um modelo matemático tridimensional transiente foi usado para prever a transferência de calor e massa, o teor de umidade e a distribuição de temperatura no interior do sólido cerâmico. A construção da geometria e da malha foram feitas no *software* ICEM CFD®. A configuração da simulação, como escolha das condições de contorno e iniciais foi feita com o *software* ANSYS CFX®. Foram simulados secagem nas temperaturas de 60, 80 e 100°C sendo reproduzidos numericamente. A modelagem matemática proposta foi adequada e os resultados numéricos da temperatura no vértice dos tijolos e da massa de água perdida apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais. Enfim pode-se concluir que a posição do tijolo dentro da estufa afeta diretamente a sua secagem, em comparações realizadas com outros trabalhos, com o fluxo de ar em direção aos orifícios do tijolo resultou em diminuição do tempo de secagem e conseqüentemente, foi possível verificar que a economia energética em comparação a literatura.

Palavras-Chave: Numérico. Simulação. Desumidificação. CFD.

ABSTRACT

Ceramic materials are constructed from natural or synthetic raw materials. The ceramic brick manufacturing process, after the raw material is removed from deposits, undergoes previous treatments such as homogenization, material shaping, drying and burning steps. Drying is the phase that needs more care, as it will ensure the removal of all moisture in order to preserve the quality of the product. Simulation using a mathematical model is used to represent experimental data. This work aims to predict the phenomenon of heat and mass transfer in the drying of ceramic bricks through mathematical models. Considering constant thermophysical properties, a transient three-dimensional mathematical model was used to predict heat and mass transfer, moisture content and temperature distribution within the ceramic solid. The construction of the geometry and the mesh were made in the ICEM CFD[®] software. Simulation configuration, such as choice of boundary and initial conditions, was done with ANSYS CFX[®] software. Drying at temperatures of 60, 80 and 100°C were simulated and reproduced numerically. The proposed mathematical modeling was adequate and the numerical results of the temperature at the apex of the bricks and of the lost water mass showed a good agreement with the experimental data. Finally, it can be concluded that the position of the brick inside the kiln directly affects its drying, in comparisons made with other works, with the air flow towards the brick holes resulted in a reduction in drying time and, consequently, it was possible to verify than energy savings compared to literature.

Keywords: Numerical. Simulation. Dehumidification. CFD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema produtivo da cerâmica vermelha.	19
Figura 2 Processo de prensagem e extrusão de tijolo	21
Figura 3 Processo de secagem.....	22
Figura 4 Processo de queima	23
Figura 5 processo de armazenamento.....	23
Figura 6 Secagem de uma superfície sólida.	25
Figura 7 Curva genérica do teor de umidade em processos de secagem de materiais.	28
Figura 8 Estufa com circulação de ar forçada	31
Figura 9 Esquema de funcionamento da estufa com circulação de ar forçada	31
Figura 10 Geometria representativa da estufa com tijolo cerâmico	32
Figura 11 Geometria representativa do tijolo cerâmico	34
Figura 12 Geometria representativa da estufa com tijolo cerâmico	34
Figura 13 Malha hexaédrica gerada sobre o tijolo com um de seus refinamentos....	35
Figura 14 Malha hexaédrica gerada sobre o tijolo com um de seus refinamentos....	35
Figura 15 O valor temporal da temperatura do tijolo é calculado no vértice	43
Figura 16 Temperatura do tijolo para uma secagem a 60°C	44
Figura 17 Temperatura do tijolo para uma secagem a 80°C	44
Figura 18 Temperatura do tijolo para uma secagem a 100°C	45
Figura 19 Massa de água no interior do tijolo para uma secagem a 60°C	46
Figura 20 Massa de água no interior do tijolo para uma secagem a 80°C	46
Figura 21 Massa de água no interior do tijolo para uma secagem a 100°C.....	47
Figura 22 Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 60°C	48
Figura 23 Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 80°C	48
Figura 24 Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 100°C ..	49
Figura 25 Campo de Teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 60°C	51
Figura 26 Campo de Teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 80°C	52
Figura 27 Campo de Teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 100°C.....	53
Figura 28 Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C.	54
Figura 29 Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C.	55
Figura 30 Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C	55
Figura 31 Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C	57
Figura 32 Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C	57
Figura 33 Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Propriedades físico-químicas do fluido e do tijolo.	40
Tabela 2 Dados úteis para as simulações numéricas da secagem do tijolo cerâmico.	42
Tabela 3 Economia energética na secagem do tijolo cerâmico vazado industrial.....	59
Tabela 4 B.1: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 60°C.	69
Tabela 5 B.2: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 80°C.	70
Tabela 6 B.3: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 100°C.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras Latinas

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

\dot{m}_{vapor}	Vazão mássica de vapor de água	[g/s]
n	Número de medidas efetuadas	[-]
n_p	Número de parâmetros ajustados	[-]
P	Pressão do sistema	[Pa]
$P_{ar\ seco}$	Pressão do ar seco	[Pa]
P_{vapor}	Pressão de vapor	[Pa]
P_{vapor}^{Sat}	Pressão de vapor no ponto de saturação	[Pa]
R	Constante dos gases	[kJ/(kmol.K)]
r_p	Coeficiente de correlação de Pearson	[-]
S_M	Termo fonte do momento linear	[kg.m/s]
T	Temperatura absoluta	[°C ou K]
$T_{eq_interface}$	Temperatura de equilíbrio na interface	[°C]
T_{ext}	Temperatura externa	[°C]
T_{f_in}	Temperatura inicial do ar	[°C]
$T_{interface}$	Temperatura instantânea na interface	[°C]
T_{max}	Temperatura máxima	[°C]
T_{s_in}	Temperatura inicial do tijolo	[°C]
T^{sat}	Temperatura de saturação	[°C ou K]
t	Tempo	[min ou s]
\mathbf{U}	Vetor velocidade	[m/s]
U_{rel}	Umidade relativa	[-]
V_{Exp}	Valor experimental	
V_{Num}	Valor numérico	
$W_{ar\ seco}$	Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa	[m³/s]

Letras Gregas

$\delta\zeta^2$	Variância dos quadrados dos resíduos	
ε	Taxa de dissipação da energia	[J/s]
E_c	Energia cinética turbulenta	[J]
λ_f	Condutividade térmica do ar	[W/(m².K)]
λ_s	Condutividade térmica do material sólido	[W/(m².K)]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
μ_{eff}	Viscosidade dinâmica efetiva	[Pa.s]
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta	[Pa.s]
ρ	Massa específica	[kg/m³]

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

Operadores matemáticos

∇ Gradiente

Subscritos

f Fluido

s Sólido

Abreviaturas

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica

ABC – Associação Brasileira de Cerâmica

CFD – Dinâmica de Fluidos Computacionais

LCTF – Laboratório Computacional de Térmicas e Fluidos

UAEM – Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

UEPB – Universidade estadual da Paraíba

SINDICER – PB – Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha do Estado da Paraíba

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Argila	18
2.2. Produção de Tijolos Cerâmicos	19
2.2.1. Extração e Preparação da Matéria-prima	20
2.2.2. Conformação Mecânica	21
2.2.3. Processamento Térmico	22
2.2.4. Expedição	23
2.3. Defeitos na Produção de Tijolos	24
2.4. Secagem	25
2.5. Processo de Secagem do Tijolo	26
2.6. Cinética de Secagem	27
2.7. Simulação Numérica	29
2.8. Simulação Numérica da Secagem do Tijolo Cerâmico	30
3. METODOLOGIA	33
3.1. Modelagem Matemática e Problema Físico	33
3.1.1. Domínio de Estudo Computacional	33
3.2. Modelagem Matemática	35
3.2.1. Equações Constitutivas	36
3.2.1.1. Fase Sólida	36
3.2.1.2. Fase Fluida	37
3.2.1.3. Interface entre as Fases Fluidas e Sólidas	38
3.2.2. Condições Iniciais e de Contorno	39
3.2.3. Propriedades Físico-Químicas do Fluido e Sólido	40
3.2.4. Casos Simulados	40
3.3. Análise econômica	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Análise Termogravimétrica e Estimação de Parâmetros de Processo: Validação	43

4.1.1. Cinética de Aquecimento do Tijolo	43
4.1.2. Cinética de Secagem de Tijolo.....	45
4.2. Campo de Temperatura no Tijolo	47
4.3. Campo do Teor de Umidade no Tijolo	50
4.4. Campo de Temperatura do Ar	54
4.5. Campo de Massa de Água	56
4.6. Análise econômica	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores exportadores de revestimentos cerâmicos do mundo e a indústria brasileira vende seus produtos para mais de 110 países, tendo como destinos principais América do Sul, América Central, América do Norte e Caribe. No Brasil, as regiões que mais se desenvolveram foram a sudeste e a sul, em razão da maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infraestrutura, melhor distribuição de renda, associado ainda as facilidades de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, são nelas onde se tem uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. Convém salientar que as outras regiões do país têm apresentado certo grau de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, principalmente nos segmentos ligados a construção civil, o que tem levado a implantação de novas fábricas cerâmicas nessa região (GOMEZ *et al.*, 2020).

No Brasil, cerca de 290 mil pessoas são empregadas pela indústria cerâmica, gerando aproximadamente 900 mil empregos diretos e indiretos. Com um faturamento anual de 18 bilhões de reais, a indústria de Cerâmica Vermelha totaliza 4,8% da Indústria da Construção Civil no País. Na Paraíba, estima-se a movimentação anual de mais de 600 milhões de peças, sendo um milhão e meio de toneladas de argila vendidas. O setor emprega diretamente mais de 2.500 colaboradores, e envolve ao todo, cerca de 20 mil pessoas em trabalhos diretos e indiretos. O faturamento anual é de mais de 140 milhões de reais em aproximadamente 150 empresas em todo o estado (SINDICER, 2021).

O setor de cerâmica vermelha é formado por um elevado número de indústrias com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico e capacidades produtivas. Embora algumas empresas se destaquem no setor, o mesmo é caracterizado por um considerável número de pequenas e médias empresas, distribuídas ao longo de todo o país. Quanto ao nível tecnológico, algumas apresentam um elevado grau de desenvolvimento tecnológico em todo o processo de produção, seja na preparação da matéria-prima, na fabricação das peças, na secagem ou na queima. Entretanto esta não é a regra geral, e muitas empresas ainda estão num estágio bastante primitivo quanto à modernização. Por representar um setor de grande importância na geração

de empregos e na distribuição de renda, tem merecido a atenção de setores do governo, institutos de pesquisa, universidades e entidades diversas (GOMEZ *et al.*, 2020).

Para a fabricação de peças cerâmicas é necessário retirar matéria-prima explorando jazidas, realizar um tratamento prévio dessa matéria-prima, homogeneizar, conformar, secar e queimar.

Para fabricar os materiais cerâmicos, as matérias-primas podem ser naturais ou sintéticas. Os naturais, mais comuns, são: argila, caulim, quartzo, feldspato, filito, talco, calcita, dolomita, entre outros. As sintéticas incluem, entre outras, aluminas sob diferentes formas (calcinadas), carbetos de silício e os mais diversos produtos químicos inorgânicos (NASCIMENTO, 2002).

As matérias-primas são caracterizadas de acordo com a distribuição das composições de fase, distribuição de imperfeições dos cristalinos, porosidade, estrutura dos poros, estrutura, tamanho e formato das partículas, massa específica, volume específico e área específica da superfície das partículas.

A secagem possui uma larga aplicação industrial, na qual tenha sido destinada a diferentes materiais, tais como: frutas, vegetais, madeira, produtos cerâmicos entre outros. Sua operação consiste em remover a umidade dos materiais, de modo a preservar a sua qualidade no final do processo.

A remoção da umidade se dá por dois processos fundamentais:

- Transferência de calor do ar para o produto devido ao efeito da diferença da temperatura.
- Transferência de massa para o ar decorrente de uma diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre a superfície do produto e o ar que o envolve.

Desta forma, todo o processo de secagem deve acontecer de maneira controlada, para que assim ocorra de maneira uniforme, evitando elevados gradientes de teor de água e de temperatura no interior do material que podem provocar a perda da qualidade do produto, ou sua perda total (CADÉ; NASCIMENTO; LIMA, 2005).

Em se tratando de tijolos cerâmicos, o processo de secagem, sem o devido controle e elevado grau de umidade e temperatura no interior do sólido pode causar defeitos irreversíveis, tais como: trincas, deformações e até empenamentos (CADÉ; NASCIMENTO; LIMA, 2005), gerando perda na qualidade do produto. O tijolo é desumidificado em câmaras a temperaturas que oscilam normalmente entre 30 e

70°C, o tempo de secagem é variável e poderá oscilar em torno de 16 horas, conforme a ABC – Associação Brasileira de Cerâmica. Então é de fundamental importância conhecer o mecanismo do movimento de umidade e os efeitos da secagem e seu controle, uma vez que estes alteram as propriedades físicas e químicas do produto.

A presente pesquisa vem para contribuir com o estudo do processo de secagem de materiais cerâmicos em geral, mostrando a importância de se estudar o ambiente de secagem, em especial a direção do ar de secagem em relação ao material a ser secado no interior de estufas.

O tempo e a qualidade da secagem de materiais dependem do tipo, do formato e da posição do material, e da temperatura, da velocidade e da umidade do ar de secagem. Assim, o trabalho surge para provar que uma simples rotação em 90 graus do tijolo cerâmico na estufa pode acelerar significativamente o tempo de secagem e, conseqüentemente, o tempo de uso da estufa e o gasto energético.

A pesquisa também mostra a importância do uso da fluidodinâmica computacional em estudar ambientes industriais e como o CFD pode ser usado como ferramenta auxiliar e muito importante no estudo de otimização de processos de secagem.

O estudo da secagem de materiais cerâmicos vem sendo realizado de forma experimental e numérica, conforme mostra a literatura, a exemplo do trabalho de Silva (2009), que realizou a secagem experimental do tijolo cerâmico e reproduziu o processo utilizando simulação numérica, adotando condições de contorno de equilíbrio na parede do material (temperatura do ar e umidade de equilíbrio).

Porém, a realização de simulações numéricas envolvendo o meio externo na secagem é relativamente nova. O trabalho de Araújo (2019) reproduziu a secagem experimental de Silva (2009) inserindo o ar como um domínio fluido na modelagem matemática, e parâmetros como temperatura e umidade na parede do material sólido são calculados ao longo da simulação, tornando o processo mais realista. Araújo (2019) conseguiu encontrar a dependência da difusividade mássica da umidade no material sólido com a temperatura de secagem.

Assim, a implementação do domínio fluido na modelagem matemática torna possível a modificação de fatores externos e sua influência na cinética de secagem, e essa perspectiva é novidade na literatura. Este trabalho tem como inovação o estudo da posição do tijolo cerâmico com relação à direção do ar de secagem e seu efeito no tempo de processo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Contribuir na predição do fenômeno de secagem por convecção a ar quente de tijolo cerâmico industrial vazado, via simulação numérica com posição frontal do tijolo dentro do secador.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar o fenômeno de transferência de calor e massa no tijolo.
- Comparar com estudos da literatura.
- Realizar uma análise econômica energética

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Argila

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire quando umedecida com água certa plasticidade, bem como resistência mecânica após ser submetidas a um tratamento térmico adequado. Além disso, são materiais formados essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, denominados argilominerais (SILVA *et al.*, 2018). Do ponto de vista físico-químico, a argila pode ser considerada um sistema mineral disperso, no qual predominam partículas com diâmetro inferior a 2 μm (SILVA, 2009).

A argila origina-se pela desagregação de rochas que contém feldspato, por ataque químico (ácido carbônico) ou físico (erosão, vulcanismo), que produz a fragmentação em partículas muito pequenas (IDM, 2021).

Segundo Silva (2009), os tipos e aplicações das argilas:

- Argila natural: extraída e limpa, sendo utilizada em seu estado natural sem adição de outra substância.
- Argila refratária: possui resistência ao calor, podendo ser utilizada em blocos cerâmicos para proporcionar maior plasticidade e resistência a altas temperaturas. São amplamente utilizadas na produção de placa refratária, como material de isolamento térmico e forro de forno. Usualmente existe uma proporção de ferro e está relacionada aos depósitos de ferro e carvão.
- Caulim ou argila da china: o solo original usado para fazer massa de porcelana possui coloração branca e derrete a 1800°C, sendo considerada pouco plástica, devendo ser moldada em formas.
- Argilas de bola (*Ball Clay*): é uma argila secundária muito plástica, que possui uma coloração azul ou preta, apresentando alto encolhimento quando seco e quando queimado vitrifica à 1300°C.
- Argilas para grés: é uma argila de grão fino, plástica, sedimentar e refratária. Vitrificam entre 1250 e 1300°C. O feldspato atua como material fundente e após a queima sua cor varia do vermelho escuro ao rosa e até mesmo acinzentado do claro ao escuro.

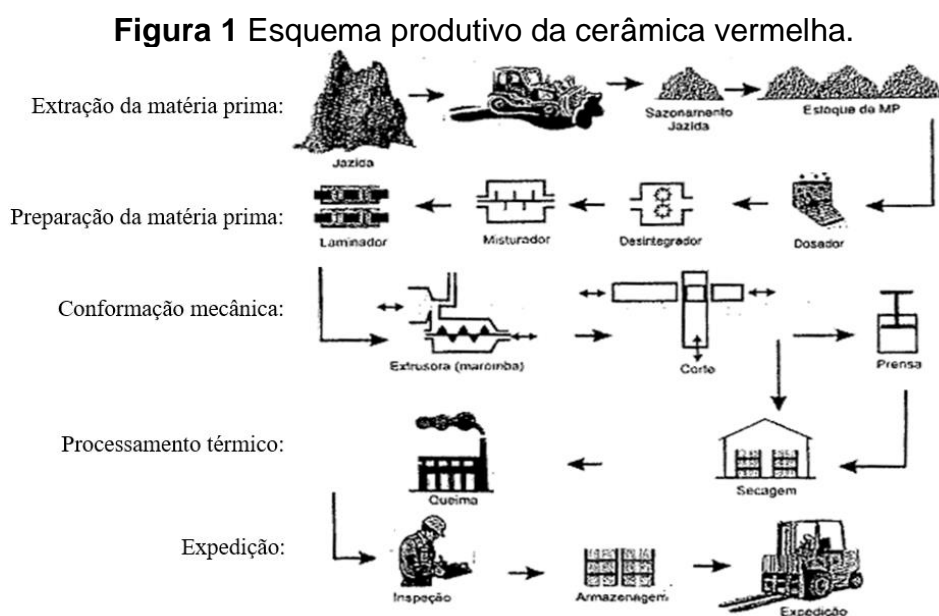
- Bentonita: uma rocha vulcânica altamente plástica com um aumento de 10 a 15 vezes. O volume aumenta após com a água e funde-se por volta de 1200°C.
- Argila expandida: produzida em um grande forno rotativo, expande a altas temperaturas (1100°C). Essa argila é leve, tem alta resistência mecânica, inércia química (ambiente ácido e alcalino), estabilidade dimensional e possui excelente propriedade térmico e acústico.
- Argilas vermelhas: são argilas plásticas com alto teor de ferro e sua cor quando úmida é marrom. Resistem a temperaturas de até 1100°C.

A argila vermelha é amplamente utilizada na fabricação de tijolos cerâmicos vermelhos.

2.2. Produção de Tijolos Cerâmicos

Segundo Silva (2009), o processo produtivo da cerâmica vermelha ainda é pouco desenvolvido, porém as inovações tecnológicas adotadas por algumas empresas têm ajudado a aumentar a produção e a qualidade de seus produtos. O processo produtivo para fabricação de tijolos cerâmico compreende as seguintes etapas.

De forma simplificada a Figura 1 apresenta o esquema produtivo da cerâmica vermelha, de acordo com Pauletti (2001).



Fonte: Pauletti (2001).

2.2.1. Extração e Preparação da Matéria-prima

De acordo com Mafra (1999), essa etapa produtiva consta de várias transformações, sejam elas:

- **Extração:** Normalmente, a fonte da matéria-prima encontra-se próximo a empresa. E para extrair a argila é utilizada uma retroescavadeira. Todos os insumos são transportados das jazidas para os galpões de estocagem.
- **Estocagem:** Algumas cerâmicas têm seus próprios depósitos de argilas, enquanto outras adquirem de terceiros. Nesta fase, conhecida como “descanso” ou “sazonamento”. As mudanças químicas e o processo de desempacotamento são benéficos para o processo de produção, além de dar garantias de produção na época de chuva. Ao usar duas ou mais argilas no processo produtivo, ocorre a pré-mistura, que pode ser realizada manualmente ou por pás carregadeiras, conforme o percentual de cada matéria-prima utilizada obtendo-se uma massa única e homogênea.
- **Dosagem:** A argila é levada ao alimentador dosador ou diretamente a correias transportadoras, onde as matérias-primas são proporcionalmente dosadas, dependendo de suas características cerâmicas.
- **Desintegração:** Quando a argila é muito dura e compactada, elas passam por um triturador, que tem como função de triturar os aglomerados maiores de argila, de modo a facilitar as operações posteriores.
- **Mistura:** A matéria-prima é colocada no misturador, equipamento que realiza movimento circulares, permitindo assim, a homogeneização da massa e introdução de água na mistura, para a obtenção da umidade (18 a 30%) e plasticidade adequada para a extrusão.
- **Laminação:** Após a fase de mistura, a argila passa pelo laminador, que completa a mistura e é responsável por um adensamento, eliminando bolhas de ar ou aglomerados remanescente antes de serem levadas às extrusoras. Existem casos em que a extrusora podem ter um laminador acoplado na entrada do equipamento.

2.2.2. Conformação Mecânica

A conformação mecânica envolve a obtenção de produtos com formas e tamanhos específicos a partir de uma massa plástica de argila. Existem vários processos para a formação das peças cerâmicas, dos quais depende basicamente de fatores econômicos, geometria e características do produto. O método mais comumente usados inclui: colagem, prensagem, extrusão e torneamento (ABCERAM, 2019).

- Prensagem: Tem como finalidade moldar a peça e torná-la mais resistente capaz de suportar as diversas solicitações ao longo do processo produtivo, além de proporcionar peças uniformes, de acordo com as dimensões e as dimensões e geometria pré-definido. Permite que o produto exiba características de microestruturas desejadas que irão determinar as características técnicas da peça.
- Extrusão: Esta é realizada em extrusora, no qual tem por objetivo dar forma ao produto, onde a massa é impulsionada, por meio de um propulsor (o mais comum é um parafuso sem fim), através de uma chapa de aço perfurada, lançando-a dentro de uma câmara de vácuo. O ar é removido pela câmara de vácuo e o material extraído por meio de outro parafuso sem fim que o impele, através de uma matriz de aço (boquilha), conformando a massa no formato desejado.

Figura 2 Processo de prensagem e extrusão de tijolo



Fonte: Bela Vista Tijolos (2021)

2.2.3. Processamento Térmico

Envolve as operações de secagem e queima das peças já preparadas e formada. Nesta fase ocorrem a perda de umidade e a transformação da estrutura e composição, resultando nas propriedades finais, como brilho, cor, porosidade, resistência à flexão, ao gretamento e às altas temperaturas, ao tanque de agente químico, entre outras (PAULETTI, 2001).

- Secagem: Após a conformação mecânica, os tijolos úmidos são transportados para secadores artificiais, onde são empilhados em blocos (Figuras 3). O objetivo desta etapa é a redução da umidade do produto de 20 a 25% após a prensagem e extrusão, para 3 a 10% após a secagem, ocorrendo uma contração (encolhimento) por cerca de 4 a 10%. Quando a secagem é natural, os tijolos são empilhados em um galpão coberto e alinhados em prateleiras (fixas ou móveis) ou apenas empilhados no chão. O tempo de secagem depende de condições atmosféricas (temperatura e umidade relativa) e ventilação local. A secagem artificial é realizada em câmaras de secagem, usando o calor residual dos fornos.

Figura 3 Processo de secagem



Fonte: Bela Vista Tijolos (2021)

- Queima: é realizada em forno (Figura 4). As etapas de secagem e queima são as que consomem a maior parte do combustível. A temperatura de queima de tijolos é de 750 a 900°C, de telhas de 900 a 900°C e de tubos cerâmicos 950 a 1200°C. Os fornos podem ser classificados como: intermitentes (abóboda ou paulistinha, garrafão, chinês, caipira e chama reversível) ou contínuos (Hoffman ou semi-contínuo e túnel).

Figura 4 Processo de queima



Fonte: Cegaza (2021)

2.2.4. Expedição

De acordo com Silva (2009), a expedição é a etapa final do processo produtivo e pode ser subdividida nas etapas:

- Inspeção: etapa realizada na saída do forno, rejeitando material quebrado, trincado, lascado ou queimado em excesso.
- Armazenamento: é realizado em área coberta, permanecendo no local até o carregamento para expedição (Figura 5).
- Entrega ao cliente: efetuada por caminhões próprios ou locados por rodoviárias.

Figura 5 processo de armazenamento



Fonte: Bela Vista Tijolos (2021)

2.3. Defeitos na Produção de Tijolos

De acordo com Oliveira *et al.* (2005) podem ocorrer vários defeitos na produção de tijolos, dentre eles:

- Empenamentos: É causado por diversos fatores, tais como:
 - Secagem diferencial: Se uma face da peça secar mais rápido que o outro irá formar um gradiente residual de contração que pode deformar a peça.
 - Mal posicionamento no suporte de secagem: A colocação inadequada sobre os suportes, para a secagem, pode provocar empenamentos na peça.
 - Boquilhas de fieira: este tipo de empenamento é visto após a secagem.
- Eflorescência: Ocorre na superfície dos tijolos, onde se formam depósitos de sais que apresentam cores e manchas indesejáveis. Os tijolos queimados absorvem a umidade da água da chuva, da atmosfera e do terreno. A água absorvida pelo tijolo dissolve os sais, mas, caso o ambiente externo esteja mais seco, ocorre o contrário, evapora-se a água da superfície dando lugar a cristalização dos sais.
- Coração negro: São manchas negras e cinzas que podem ser visualizadas ao longo da seção transversal das peças após o processo de queima.
- Trincas: As trincas são pequenas fissuras causadas pela secagem rápida. Normalmente, inicia-se nas bordas e propagam-se até o centro da peça. As trincas de queima podem ser: aquecidas ou resfriadas. As trincas de aquecimento se caracterizam por serem poucas sinuosas, abertas e de bordas dentadas, já as trincas de resfriamento se caracterizam por possuir bordas finas e fechadas, normalmente, em forma de S.

Muitos defeitos que aparecem na saída do secador são produzidos em etapas do processo produtivo e não tem nada a ver com a secagem. Então uma homogeneização desigual da pasta causará retrações locais diferenciais. É comum acontecer nos processos de fabricação manual.

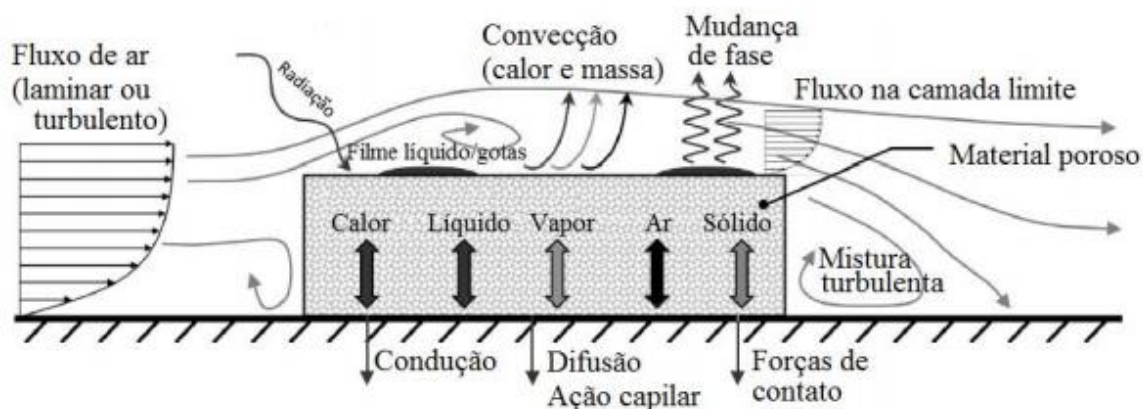
- Microfissuras produzida pela extrusora: Para reduzir este problema, recomenda-se adicionar redutores de plasticidade na pasta ou então modificar a geometria do molde para dar uma maior rugosidade. Um defeito relacionado é a existência de vazios. Se existe ar incorporado, a orientação preferencial

resultante da extrusão funciona como um selante, podendo resultar no inchamento do material. Outro fator é atribuído a fase da secagem, como má colocação das peças no secador.

2.4. Secagem

A secagem é um processo termodinâmico (Figura 6), através do qual é reduzida a umidade do sólido mediante o fornecimento de energia ao mesmo. O transporte de umidade do interior para a superfície pode ocorrer na forma de líquido ou vapor, dependendo do tipo de produto e porcentagem de umidade presente (ALMEIDA, 2003).

Figura 6 Secagem de uma superfície sólida.



Fonte Araújo (2019).

Devido à complexidade e importância do processo de secagem, os modelos matemáticos que os descrevem se tornaram o assunto de muito pesquisadores.

O processo de secagem envolve fenômenos complexos de transferência de calor e massa, quantidade de movimento e variações dimensionais, por isso a simulação numérica do processo é tão importante para prever um fenômeno com realismo físico.

É importante inserir o máximo de informações possíveis no modelo matemático de secagem, tais como: mecanismo de transferência de calor e umidade dentro do sólido, coeficiente de difusão, taxa de encolhimento, transferência de calor e massa acoplados e condições ambientais externas próximas aos sólidos.

De acordo com a espessura da camada de material estudado, esses modelos podem ser divididos em modelos de secagem de camada fina (modelos à nível de partícula) e camadas espessas (modelos de nível de secador).

A real importância da secagem em camada fina tem limitações porque os materiais são secos em camadas grossas: estacionárias ou em movimentos. Os modelos mais comumente usados pelos pesquisadores consideram propriedades termofísicas, cinética de secagem e o balanço de massa e energia no secador, tendo em vista a necessidade de uma equação para a cinética de secagem do material em camada fina em determinadas condições operacionais pré-estabelecidas.

2.5. Processo de Secagem do Tijolo

A secagem é uma etapa essencial na produção da cerâmica, sendo a etapa que requer muita energia térmica para evaporar a água adicionada durante o processo de extrusão das peças. Para a secagem natural ou artificial é necessário muito ar para cumprir quatro funções básicas: transporte de calor necessário à evaporação, o arraste do vapor d'água produzido, a redução da camada de vapor saturado formado na superfície da peça e o movimento de líquido e/ou vapor dentro da peça (MACEDO, 2016).

Em termos de termodinâmica, analisa-se os efeitos da temperatura e umidade relativa do ar no processo. A umidade relativa do ar é a relação entre a pressão parcial de vapor e a pressão de saturação do vapor na sua temperatura. A pressão de saturação do vapor d'água no ar aumenta com o aumento da temperatura e quanto mais distante da pressão de saturação estiver a pressão parcial do vapor, quanto maior a capacidade do ar de absorver o vapor d'água evaporado das peças e secar (KAWAGUTI, 2004; MACEDO, 2016).

Portanto a capacidade do ar de absorver o vapor de água aumenta com a temperatura, quanto mais alta a temperatura do ar maior a sua capacidade de secagem que é fixada em função da umidade relativa do ar ambiente. Além disso, se o ar estiver mais quente, a quantidade de ar necessário na secagem diminui, sendo assim a potência dos exatores e circuladores de ar é reduzido, diminuindo-se os custos de secagem (MACEDO, 2016).

Quanto a velocidade de secagem, ela é limitada pelo comportamento da porosidade da peça. Uma vez que a umidade se encontra no interior de seus poros, a

forma e a microestrutura terão uma grande influência sobre a secagem, mesmo sob um ambiente que é termodinamicamente favorável à evaporação da água, a água pode ficar presa no interior dos poros da peça. Isso acontece quando a superfície da peça seca muito rápido e os poros ainda estão cheios de água e por ser muito estreito não consegue efetuar o transporte compatível com a da evaporação.

De acordo com a pesquisa de Kawaguti (2004), a pressão de saturação do vapor d'água no ar aumenta com a temperatura e quanto mais distante estiver a pressão de saturação da pressão parcial, maior será a capacidade do ar absorver o vapor d'água. Quando o ar mais quente diminui o volume de ar necessário à secagem há uma economia nos custos de secagem.

Quanto maior, mais pesada e mais irregular a peça, maior a possibilidade de ocorrer problema durante a secagem. Deve-se ter cuidado na fabricação de peças que demoram vários dias para concluir, pois a umidade da massa, que está sendo usada, pode variar e provocar problemas na secagem, principalmente, nas emendas (SILVA, 2009).

2.6. Cinética de Secagem

A velocidade da secagem de um material cerâmico é influenciada diretamente por fatores como temperatura, velocidade e umidade relativa do ar. Assim, seguem alguns conceitos.

A razão de mistura (ω) é uma propriedade que mede o quanto de massa de vapor de água (m_{vapor}) está presente em uma determinada massa de ar seco ($m_{ar\ seco}$), conforme Equação 2.1 (ARAÚJO, 2009).

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

Essa razão de mistura também pode ser dada em função da pressão de vapor no ar (P_{vapor}) e da pressão ambiente (P):

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} \quad (2.2)$$

A umidade relativa é uma grandeza adimensional definida como razão entre a pressão parcial de vapor em um meio pela pressão parcial de vapor no ponto de saturação. Matematicamente, a umidade relativa (U_{Rel}) é definida por (Araújo, 2019):

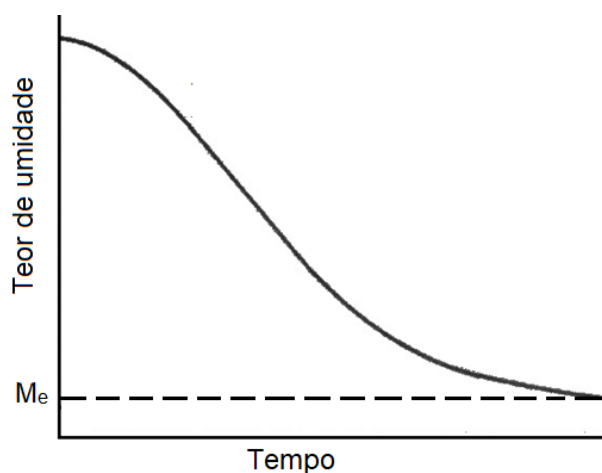
$$U_{Rel} (\%) = \frac{P_{\text{vapor}}}{P_{\text{vapor}}^{\text{sat}}} \times 100\% \quad (2.3)$$

O termo teor de umidade em base seca de um material, ou simplesmente teor de umidade (M), representa a razão da massa de líquido (em geral, água) que um material contém pela massa seca daquele material (Equação 2.4) (Araújo, 2019):

$$M = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa seca do material}} \quad (2.4)$$

O teor de umidade de um material comporta-se como uma curva decrescente ao longo do processo de secagem (Figura 7).

Figura 7 Curva genérica do teor de umidade em processos de secagem de materiais.



Fonte Araújo (2019).

Um dos mecanismos mais conhecidos para descrever os fenômenos físicos ocorrentes durante o período de taxa decrescente no processo de secagem é o da difusão, que é característico de materiais de secagem lenta, ocorrendo mais frequentemente em materiais não porosos (ARAÚJO, 2019).

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 (ARAÚJO, 2019).

A taxa de secagem é definida como a velocidade com que o material é secado e diminui com o decréscimo do teor de umidade. Ou seja, ao longo da secagem a perda de umidade vai se tornando mais lenta. Isto ocorre porque a diferença de concentração de massa de água no tijolo e no meio externo diminui com o tempo.

O teor de umidade no material possui o maior valor no início do processo de secagem e este valor decresce no decorrer do processo, atingindo um valor de equilíbrio nos instantes finais (ARAÚJO, 2019).

Na teoria da difusão líquida, conhecida como segunda lei de Fick, a difusão da umidade é geralmente controlada pela transferência de massa interna (CHEN *et al.*, 2012), sendo dada por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.5)$$

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

2.7. Simulação Numérica

Um modelo matemático é um conjunto de equações ou estruturas matemáticas, elaborado para corresponder algum fenômeno que pode ser físico, biológico, social, psicológico, conceitual ou outro modelo matemático (BASSANEZI, 2004).

Nas últimas décadas, surgiram vários métodos computacionais avançados aplicados a secagem de materiais porosos, entre os quais a Dinâmica de Fluidos Computacionais (CFD) teve um bom desempenho. Este é um método de modelagem avançada bem conhecido e amplamente utilizado, que pode ser aplicado a secadores de convecção, secadores por pulverização, secadores de bandeja, secadores de flash e secadores de leito fluidizado.

Defraeye (2014) estudou o uso do CFD na tecnologia de secagem, considerando publicações em periódicos relacionados a CFD de 2008 a 2013 e constatou que naquela época a simulação numérica não era representativa do número de artigos publicados sobre secagem. A simulação numérica tem sido amplamente utilizada para simular a secagem de partículas úmidas ou gotículas com substâncias sólidas no interior.

De acordo com o mesmo autor, o CFD é usado para obter o fluxo e a trajetória das partículas, o tempo de secagem das partículas, tempo de residência, o local de deposição das partículas e a influência das condições de secagem e *design* da câmara durante o processo de secagem das partículas. O CFD oferece uma alternativa para estudos experimentais em laboratório, plantas piloto ou larga escala, bem como tem a vantagem especial de monitorar o fluxo de partículas e o comportamento de secagem com resolução espacial muito alta.

Na literatura encontram-se trabalhos que tratam da simulação numérica de ambientes de secagem e construções de alvenaria, como os trabalhos de Agrawal *et al.* (2021), Refaey *et al.* (2021) e Vijayana *et al.* (2021). O estudo da secagem de materiais cerâmicos envolvendo o domínio fluido (ar) além do sólido é encontrado em pouquíssimos trabalhos (SANTOS, 2019; ARAÚJO, 2019).

Para a modelagem numérica tem-se no mercado vários pacotes e códigos computacionais dos mais diversos que possui um *software* com equações discretizadas que podem ser utilizadas na resolução de problemas. O pacote comercial Ansys CFX[®] tem vários programas, sendo os mais importantes: Ansys ICEM-CFD[®] e Ansys CFX[®].

No Ansys ICEM-CFD[®] são construídas as geometrias a partir de pontos, curvas e superfícies. As malhas numéricas foram baseadas na geometria, que consistiu em subdividir o domínio espacial em espaços pequenos (chamados de elementos), ou seja, a discretização do domínio contínuo para que a equação do fenômeno possa ser resolvida. O *software* permite a construção de malhas tetraédricas (onde os elementos têm forma de pirâmide com base triangular) e os hexaédricos (onde os elementos têm formato de paralelepípedos).

2.8. Simulação Numérica da Secagem do Tijolo Cerâmico

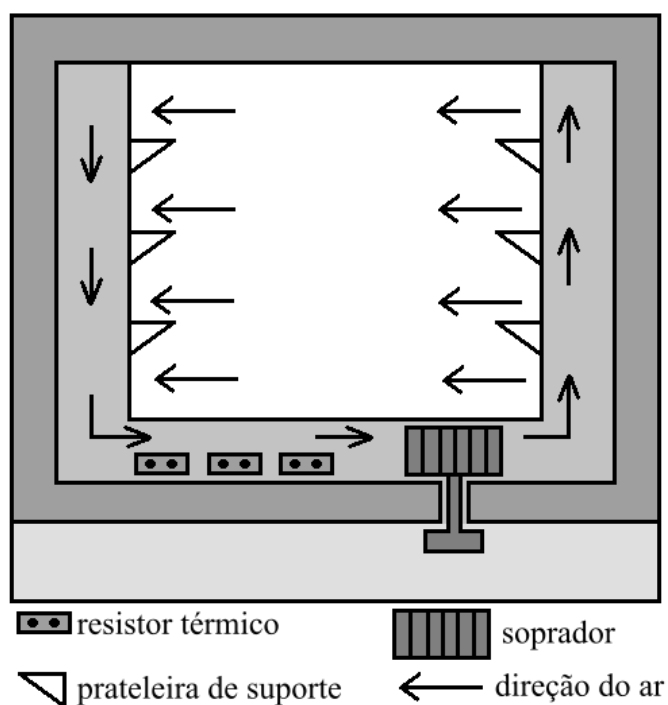
O trabalho de Araújo (2019) trata da reprodução numérica da secagem experimental de tijolos cerâmicos em estufa com circulação mecânica de ar de fabricação da FANEM mod. 320E (Figura 8), cuja circulação de ar ocorre no sentido indicado pela Figura 9.

Figura 8 Estufa com circulação de ar forçada



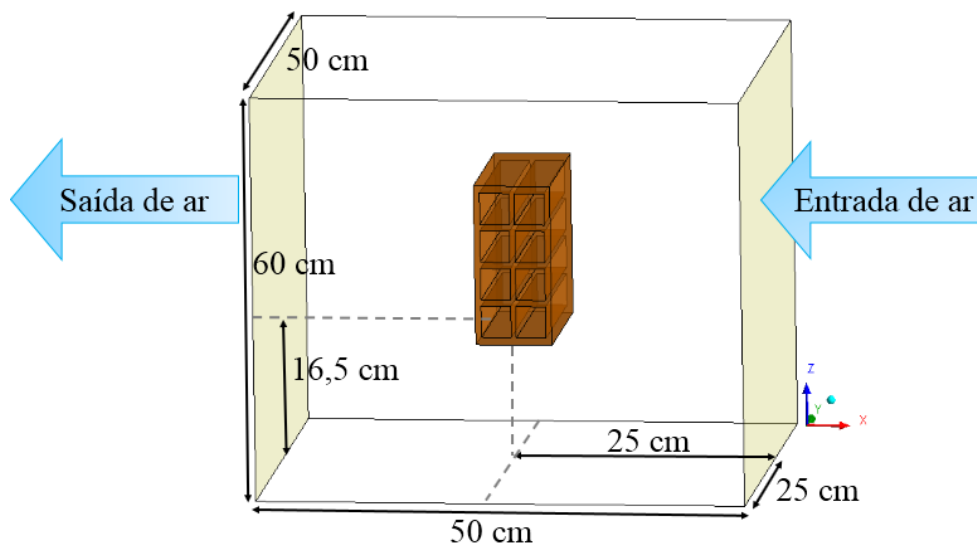
Fonte Silva (2009).

Figura 9 Esquema de funcionamento da estufa com circulação de ar forçada



Fonte Araújo (2019).

Araújo (2019) simulou o processo com o tijolo na mesma posição utilizada por Silva (2009) na secagem experimental, conforme apresentada na Figura 10. Pode-se notar que o ar atravessa lateralmente o tijolo.

Figura 10 Geometria representativa da estufa com tijolo cerâmico

Fonte Araújo (2019).

Araújo (2019) estudou teoricamente a secagem de tijolos cerâmicos vazados industriais. Uma modelagem matemática avançada para prever as transferências de calor e massa no material ao longo do processo, baseada no modelo da difusão líquida, é apresentada. Resultados das cinéticas de redução de umidade e elevação da temperatura no interior do material são apresentadas.

A solução numérica do modelo foi obtida via software CFX. Verificou-se que a difusividade mássica varia fortemente com a temperatura e que a posição do tijolo no interior da estufa influencia diretamente nos campos de umidade e de temperatura no interior do tijolo e, conseqüentemente, na qualidade do produto. Isto significa que além da velocidade, da temperatura e da umidade do ar, a direção de escoamento do ar também afeta a cinética de aquecimento e secagem e a distribuição de calor e umidade no material sólido.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) em parceria com o Laboratório Computacional de Térmicas e Fluidos (LCTF) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.1. Modelagem Matemática e Problema Físico

No presente trabalho, a modelagem matemática foi realizada usando o *Ansys Icem-CFD*[®] e envolveu a secagem em estufa de tijolo cerâmico industrial vazado, utilizando-se como base o modelo desenvolvido por Araújo (2019).

Para validar o código ou modelo matemático foram utilizados dados experimentais extraídos de Silva (2009) e Araújo et al. (2019).

3.1.1. Domínio de Estudo Computacional

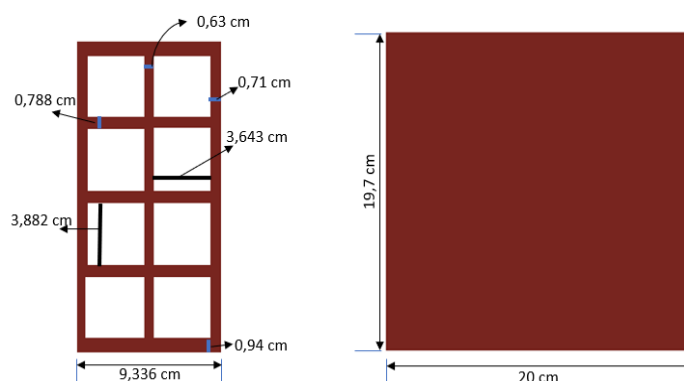
Para reproduzir a área de estudo da estufa as medições foram feitas manualmente, para poder construir sua geometria no software Icem CFD. Foram implantadas as dimensões computacionais tanto da estufa de secagem com circulação de ar forçada, quanto do tijolo cerâmico industrial vazado.

A entrada e a saída do ar de secagem que podem reproduzir os fluxos de ar adotados, bem como a direção do fluxo de ar na simulação numérica foram exibidas na Figura 9. As medições foram implantadas para poder construir sua geometria no *software* Icem CFD.

Nesse modelo de estufa é possível utilizar três bandejas, sendo escolhida estudar apenas uma bandeja na parte inferior para colocar o tijolo, no intuito de buscar o mais próximo possível da saída da vazão de ar, reduzindo assim os interferentes fluidodinâmicos. Foi considerada que a entrada e a saída do ar de secagem podem reproduzir a direção do fluxo de ar na simulação numérica.

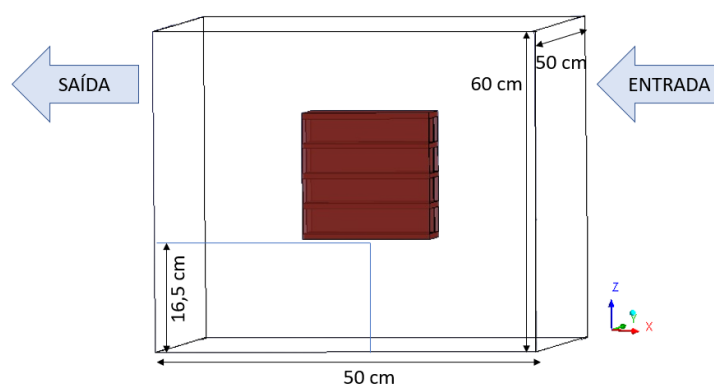
As Figuras 11 e 12 ilustram a geometria do tijolo e da estufa, respectivamente, juntamente com suas dimensões contendo o tijolo cerâmico vazado. A geometria foi construída utilizando o *software* Icem CFD.

Figura 11 Geometria representativa do tijolo cerâmico



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 12 Geometria representativa da estufa com tijolo cerâmico

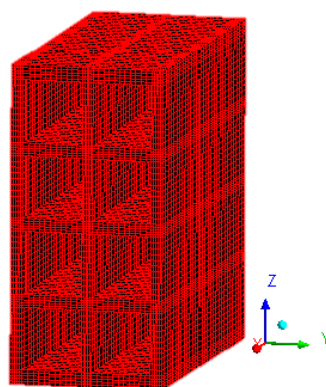


Fonte: Próprio autor (2021).

Foi escolhida de acordo com a geometria a malha hexaédrica sobre o tijolo (Figura 10) com 45.965 elementos hexaédricos e 55.800 nós e sobre a estufa (Figura 11) contendo a malha numérica sobre o domínio da estufa com tijolo contendo 510.235 elementos hexaédricos e 540.704 nós.

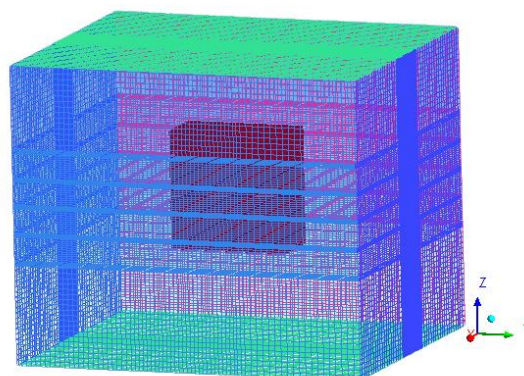
O refinamento dos tijolos é projetado para ser usado em todas as direções da grade ao redor dos tijolos. Deve-se lembrar que o refinamento da grade da estufa só é realizado após a análise dos resultados da dependência da grade dos tijolos isoladamente.

Figura 13 Malha hexaédrica gerada sobre o tijolo com um de seus refinamentos



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 14 Malha hexaédrica gerada sobre o tijolo com um de seus refinamentos



Fonte: Próprio autor (2021).

3.2. Modelagem Matemática

A modelagem matemática inclui dois domínios, o sólido que é representado pelo tijolo cerâmico e o fluido que é representado pelo ar no interior da estufa.

O modelo desenvolvido incorpora mecanismos de transferência de calor e massa no interior do tijolo e em sua superfície durante a secagem. Devido à complexidade das equações para descrever o modelo matemático, foram realizadas as seguintes considerações simplificadoras para facilitar a simulação numérica:

- Não ocorre geração de massa no interior do produto durante o processo.
- Material composto unicamente de água na fase líquida e matéria sólida.
- As propriedades termofísicas constantes para cada produto.

- Dilatação do produto devido à elevação de temperatura durante a secagem desprezível.
- Sem encolhimento.
- Transferência de calor e massa unidirecional.
- Não ocorre reação química, físico-química ou bioquímica durante o processo de secagem.
- Distribuição uniforme de ar através do secador.
- Tijolo homogêneo.
- Defeitos gerados durante o processo de moldagem não foram considerados.

3.2.1. Equações Constitutivas

3.2.1.1. Fase Sólida

As equações governantes consideradas no modelo matemático para a fase sólida são as equações de conservação de massa e energia.

A massa d'água é introduzida nos domínios sólido e fluido como uma variável adicional. Portanto, neste domínio, segundo pode ser visto em Incropera e Dewitt (2002), a equação de transferência não-estacionária de massa para difusão de umidade em um material homogêneo é expressa pela Equação (3.1).

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

Em que $\frac{\partial m}{\partial t}$ é a taxa mássica no material (g/min ou s); m é a massa de água no material (g) e D_{mS} é o coeficiente de difusão mássico no sólido (m²/s)

O modelo matemático que descreve o processo experimental de transferência de calor condutiva no interior do tijolo se baseia na Lei de Fourier. Considerando a secagem como um processo adiabático, pode-se dizer que a energia, sob a forma de calor que entra na massa do produto é igual à energia, sob a forma de calor que sai no ar (LUIZ, 2012). Este pode ser representada pela Equação (3.2).

$$\frac{\partial(\rho_S h_S)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_S \nabla T_S) \quad (3.2)$$

Em que $\frac{\partial(\rho_S h_S)}{\partial t}$ é o fluxo de energia na forma de calor (W/m².s); ρ_S é a massa específica (kg/m³), h_S é a entalpia (J), t é o tempo (min ou s), λ_S é a condutividade térmica (W/(m².K)) e T_S é a temperatura (°C).

3.2.1.2. Fase Fluida

A equação para a conservação da massa de ar no domínio do fluido é expressa pela Equação (3.3).

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

Em que ρ_f é a massa específica do ar (kg/m³) e \mathbf{U} é a velocidade do ar dentro da estufa (m/s).

A equação para conservação de momento linear é dada pela Equação (3.4).

$$\frac{\partial(\rho_f \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{U} \mathbf{U}) = \nabla p + \nabla \cdot \{\mu_{eff} [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T]\} \quad (3.4)$$

Em que ∇p é o gradiente de pressão (Pa/m); μ_{eff} é a viscosidade dinâmica efetiva (Pa.s); T é a temperatura interna da estufa (°C ou K).

A equação da conservação da massa de água no domínio fluido é dada pela Equação (3.5).

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

Em que D_{mf} é o coeficiente de difusão mássico de água no ar (m²/s).

Para a transferência de calor no fluido adotou-se o modelo de energia térmica, o qual é adequado para fluxos a baixas velocidades. Desconsiderando o aquecimento interno devido ao atrito e o termo fonte, a Equação (3.6) descreve a referida transferência de calor.

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

Em que h_f é a entalpia (J); λ_f é a condutividade térmica (W/(m².K)) e T_f é a temperatura do ar (°C).

A equação adicionada na simulação para prever o fenômeno de turbulência pelo fluxo de fluido no domínio, escolheu-se o modelo κ - ϵ , classificado em dois

modelos de equação (BARBOSA, 2011; ANSYS, 2013). A viscosidade do fluido para esse modelo é expressa pela Equação (3.7).

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

Em que μ_t é a viscosidade turbulenta (Pa.s) que é definida pela Equação (3.8).

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

Em que C_μ é uma constante com valor de 0,09; κ representa a energia cinética (J) e ε representa a taxa de dissipação de energia (J/s).

Os parâmetros κ e ε são obtidos a partir das soluções das Equações (3.9) e (3.10) (BARBOSA, 2011; ANSYS, 2013).

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

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

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

3.2.1.3. Interface entre as Fases Fluidas e Sólidas

Entre os domínios da fase líquida e sólida, adotou-se uma condição de fluxo conservativo de massa e energia, *conservative interface flux*. Assim, essa condição representa o fluxo na interface entre as duas fases. Nesta simulação numérica, o elemento de transição entre os domínios sólido e líquido foi a água, que é chamada de variável adicional na modelagem numérica.

Devido às condições de fluxo conservadoras, pode-se considerar que a variável se difunde pela região sólida até encontrar uma interface que separa da região do fluido. A difusão ocorre por convecção, que é característica do terceiro material de contorno ordenado.

Portanto, pode-se modelá-los matematicamente da seguinte forma: o fluxo difusivo da massa de água na camada limite sobre o tijolo é igual ao fluxo conservativo

da massa de água no domínio do fluido, que representa o vapor de água e a mistura de ar seco.

Essa troca é realizada por meio de uma interface sem perda de qualidade, conforme mostrado na Equação (3.11), o único atributo inicialmente estabelecido é a difusividade de massa no ar.

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

Onde $m_{interface}$ representa a massa de água (g) na interface de $m_{eq-interface}$ representa a massa de água (g) na interface na condição de equilíbrio. O coeficiente de transferência de massa convectiva é representado por h_m (m/s).

Em relação à conservação de energia, tem-se que da mesma forma que para a transferência de massa, a transferência de energia possui sentido oposto da transferência de massa, porque ela ocorre do domínio do fluido para o domínio sólido através da interface. Para a temperatura, o fluxo de calor convectivo no domínio fluido é igual ao fluxo de difusão de calor no domínio sólido. Essa troca é realizada por meio de uma interface sem perda de energia, conforme expressa na Equação (3.12).

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

Em que λ_f é a condutividade térmica do ar ($W/(m^2.K)$); h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/(m.K)$) e $T_{interface}$ é a temperatura na interface ($^{\circ}C$) e $T_{eq-interface}$ é a temperatura de equilíbrio na interface ($^{\circ}C$).

3.2.2. Condições Iniciais e de Contorno

Para as simulações da secagem, foram usadas as seguintes condições de contorno:

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

As condições iniciais são:

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

3.2.3. Propriedades Físico-Químicas do Fluido e Sólido

As propriedades físico-químicas do fluido e do sólido, tijolo cerâmico (domínio sólido) industrial vazado são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 Propriedades físico-químicas do fluido e do tijolo.

	Domínio fluido	Domínio sólido
Massa específica [kg/m ³]	1,06 a 60°C	1985,8*
	1,0 a 80°C	
	0,946 a 100°C	
Calor específico [J/(kg/K)]	1004,4	1673*
Condutividade térmica [W/(m.K)]	0,0261	1,675**
Viscosidade dinâmica [kg/(m.s)]	1,831x10 ⁻⁵	-

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

3.2.4. Casos Simulados

a) Descrição Experimental utilizado como dados de entrada para o modelo matemático proposto

Os dados experimentais de entrada utilizado no modelo matemático em estudo foi o resultado do trabalho realizado por Silva (2009) que secou tijolos cerâmicos com ar seco nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C em estufa. O experimento começou inserindo um tijolo cerâmico úmido a temperatura ambiente na estufa pré-aquecida.

Nas primeiras horas, o tijolo foi retirado da estufa a cada 10 minutos para medir dimensão, temperatura e massa. Logo após o intervalo entre as medições passou para 30 minutos até que os pesquisadores perceberam que as variáveis se tornaram constantes. Para cada temperatura de secagem, o autor calculou a umidade relativa e a velocidade de escoamento do ar na estufa e traçou curvas das cinéticas de aquecimento e de secagem do material cerâmico.

b) Casos estudados

Foram realizados testes de secagem 60, 80 e 100°C, estudando as três principais temperaturas de Araújo (2019). O coeficiente de difusão (D_{tij}) da umidade no tijolo muda com a mudança da temperatura do ar seco. Assim, como na simulação numérica deste estudo, optou-se por utilizar a massa de água (variáveis adicionais, em gramas) nos domínios sólidos e fluidos, uma vez que os tijolos são de ordem de magnitude superior, o coeficiente de difusão da água nos tijolos deve ser ajustado.

Além disso, o tijolo foi considerado como domínio sólido, ao contrário do tijolo real, que é poroso. A adaptação ocorre por tentativa e erro, em que vários valores de difusividade são aplicados, até que sejam encontrados valores que fornecem resultados numéricos mais próximos dos valores experimentais.

Utilizando-se como base Araújo (2019), na interface entre as regiões líquida e sólida foi inserida a condição de fluxo conservativo. Isso significa que toda a massa de água que passa pelo material sólido por difusão, ao chegar na interface, passa para o meio fluido e dispersa por convecção na forma de vapor.

Os dados como temperatura do ar de secagem, temperatura inicial do tijolo, umidade relativa do ar, velocidade do ar, massa de água inicial e tempo total de secagem foram retirados diretamente de Silva (2009), enquanto que os valores da vazão mássica do ar e do vapor, assim como o coeficiente de difusão da umidade no ar, foram determinados conforme roteiro de cálculo no Anexo A, de acordo com o utilizado por Araújo (2019).

As simulações são transientes, com um intervalo de tempo de 10 segundos e um resíduo quadrático médio de 10^{-8} . A Tabela 2 apresenta os dados usados na simulação. A simulação foi realizada em um computador equipado com processador core i3, 8GB de memória RAM e disco rígido de 500GB.

Os dados inseridos no programa como as condições de contorno da simulação são: temperatura do ar seco, fluxo de massa de ar, fluxo de massa de vapor, o coeficiente de difusão de umidade no ar, o tempo total de secagem e a descrição da difusividade da umidade no tijolo anterior. Ao inserir as condições iniciais: a temperatura inicial do tijolo e massa de água no tijolo e no ar da estufa.

Tabela 2 Dados úteis para as simulações numéricas da secagem do tijolo cerâmico.

Temperatura do ar de secagem [°C]	60	80	100
Difusividade da umidade no tijolo [m ² /s]	3×10^{-7}	$2,4 \times 10^{-6}$	$1,55 \times 10^{-5}$
Massa de água inicial da estufa [g]	2,68886	2,06730	1,60376
Massa de água inicial no tijolo [g]	386	394	440
Temperatura ar [°C]	60	80	100
Temperatura inicial do tijolo [°C]	20,5	21,4	26,1
Vazão mássica do ar [g/s]	15,89367	19,99141	23,64.989
Vazão mássica do vapor [g/s]	0,27145	0,27827	0,26984
Coeficiente de dif. da umid. do ar [m ² /s]	$2,8948 \times 10^{-5}$	$3,2419 \times 10^{-5}$	$3,6058 \times 10^{-5}$
Umidade relativa do ar [%]	13,58	4,68	1,8
Tempo Total [min]	820	900	860

Fonte: Silva (2009).

3.3. Análise econômica

O consumo energético pode ser obtido pela Equação (3.13).

$$\text{Consumo [kWh]} = \frac{\text{Potência [W]} \times \text{tempo[h]}}{1000} \quad (3.13)$$

O consumo em reais para o setor industrial de acordo com o valor cedido pela concessionária, pode ser obtido pela Equação (3.14).

$$\text{Consumo em reais} = \text{Potência [kWh]} \times \text{tarifa(R\$)} \quad (3.14)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Termogravimétrica e Estimação de Parâmetros de Processo:

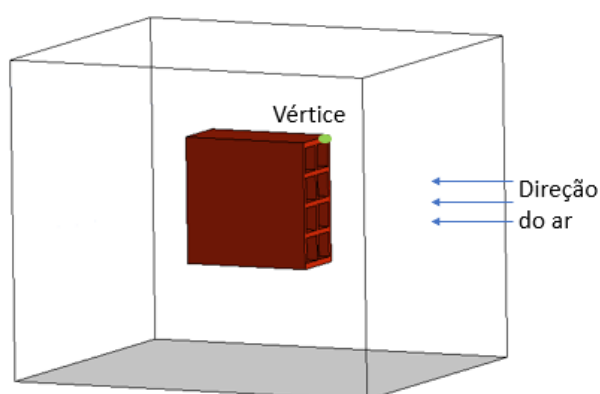
Validação

No modelo matemático usado para analisar a cinética de aquecimento e secagem do tijolo, as equações de calor e massa estão desacopladas. A variação da temperatura do tijolo e da massa de água em seu interior para as secagens a 60, 80 e 100°C estão no Anexo A, onde são apresentados os cálculos psicrométricos das condições iniciais e de contorno para cada condição de secagem.

4.1.1. Cinética de Aquecimento do Tijolo

O valor temporal da temperatura do tijolo foi calculado no vértice, conforme ilustrado na Figura 12 e comparado com os valores das temperaturas no vértice do tijolo, previstas com o uso da Equação (3.2) e os valores experimentais de Silva (2009) e Araújo (2019) foram plotados nas Figuras 16 a 18.

Figura 15 O valor temporal da temperatura do tijolo é calculado no vértice



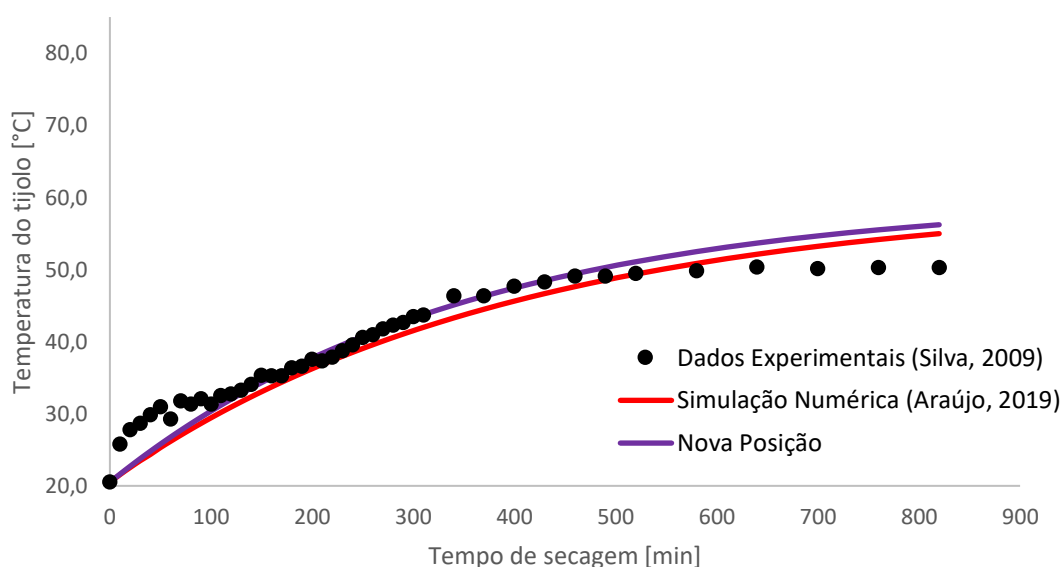
Fonte: Autora (2021).

Os fluxos de transferência de calor e massa proposto nesse trabalho é uma modificação do trabalho de Araújo (2019), fazendo-se um giro no tijolo cerâmico em 90 graus em torno do eixo Z.

Nas Figuras 16 a 18, pode-se observar que durante o tempo inicial do processo, a curva numérica (nova posição) apresenta um valor inferior ao valor experimental e

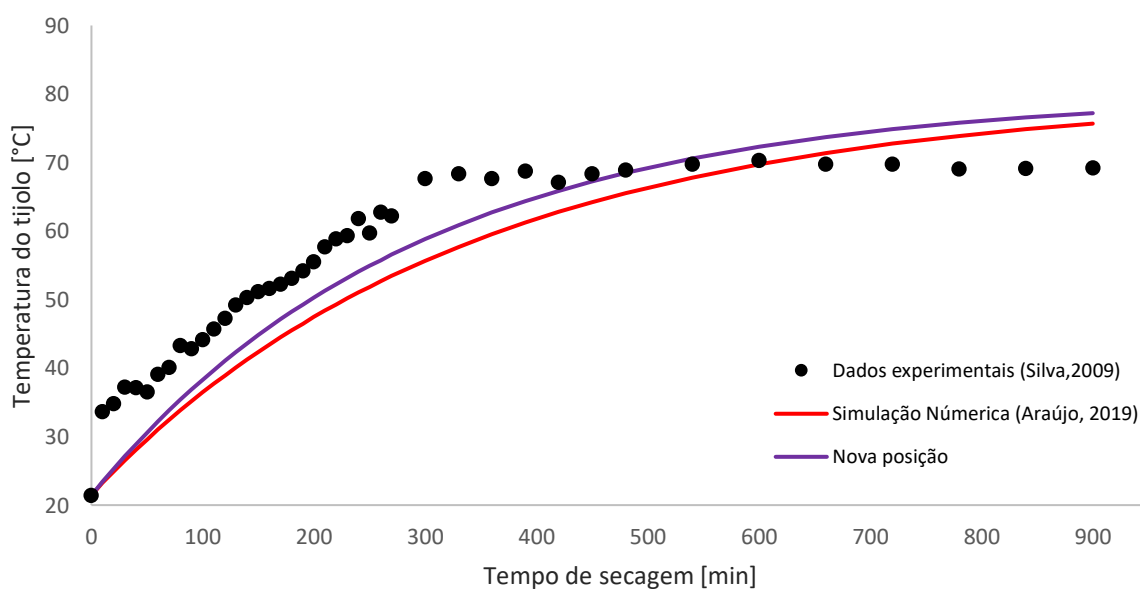
após um certo tempo, o processo é invertido e a curva numérica (nova posição) se coloca acima dos dados experimentais. Este comportamento é comum em todas as temperaturas e pode ser explicado pelo fato de serem utilizadas propriedades termofísicas constantes no domínio da fase sólida, não sendo considerada a energia necessária para evaporar a água do produto, na qual não está prevista no modelo de difusão líquida.

Figura 16 Temperatura do tijolo para uma secagem a 60°C



Fonte: Próprio autor (2021).

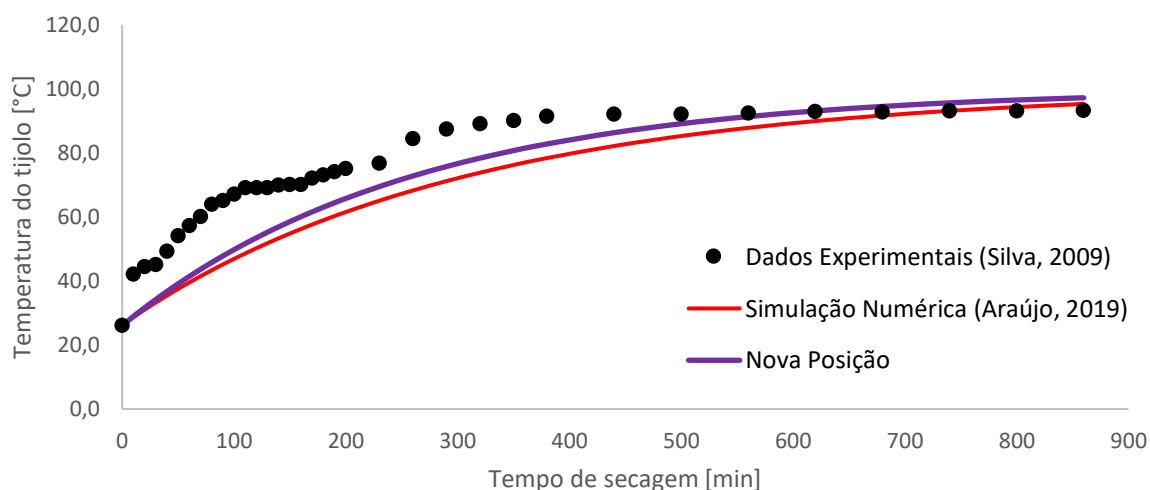
Figura 17 Temperatura do tijolo para uma secagem a 80°C



Fonte: Próprio autor (2021).

Portanto, o calor transferido ao sólido por convecção só é convertido em calor sensível para aquecer o tijolo e, na prática, o calor é convertido em calor sensível para aquecer o bloco de argila e a umidade do tijolo e em calor latente de vaporização da umidade. Portanto, a taxa de aquecimento experimental é inferior à taxa prevista pelo modelo considerado neste estudo.

Figura 18 Temperatura do tijolo para uma secagem a 100°C



Fonte: Próprio autor (2021).

A sutil diferença entre os dados experimentais e os dados numéricos também pode ser explicada pelo fato de o tijolo cerâmico serem consideradas áreas sólidas compostas por argila e água, que são representadas por variáveis adicionais na simulação, enquanto na prática o tijolo cerâmico é um material poroso.

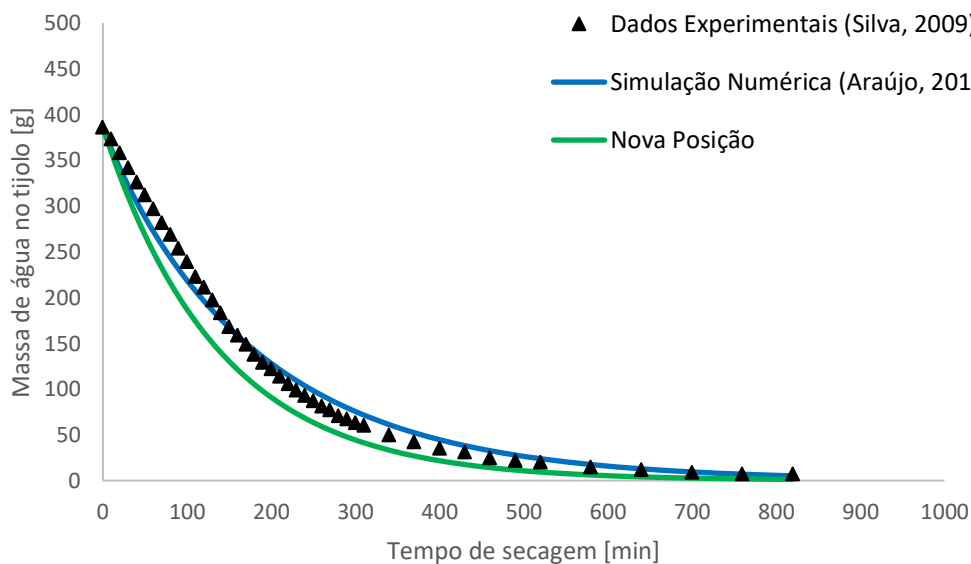
4.1.2. Cinética de Secagem de Tijolo

Para esse trabalho foi utilizado os mesmos valores adquiridos na secagem experimental do tijolo cerâmico medida a massa de água na amostra para diversos instantes de tempo ao longo do processo de acordo com Silva (2009).

A partir dos resultados numéricos apresentados no Anexo B, onde são apresentados os dados da massa de água em função do tempo de secagem, tomando os valores de massa de água nos mesmos instantes experimentais, comparou-se os dados numéricos calculados a partir da Equação 3.2, com os dados experimentais para cada condição de secagem para as secagens a 60, 80 e 100°C.

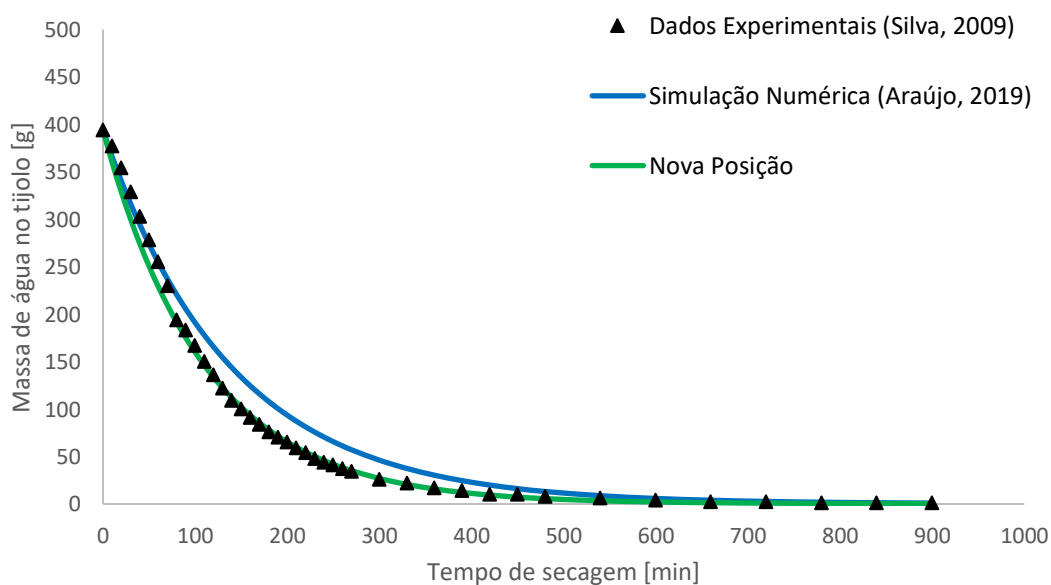
Nas Figuras 19 a 21 são ilustrados os resultados de redução de massa ao longo do tempo no tijolo, realizados por Silva (2009), Araújo (2019) e a nova posição do tijolo proposto por esse trabalho.

Figura 19 Massa de água no interior do tijolo para uma secagem a 60°C

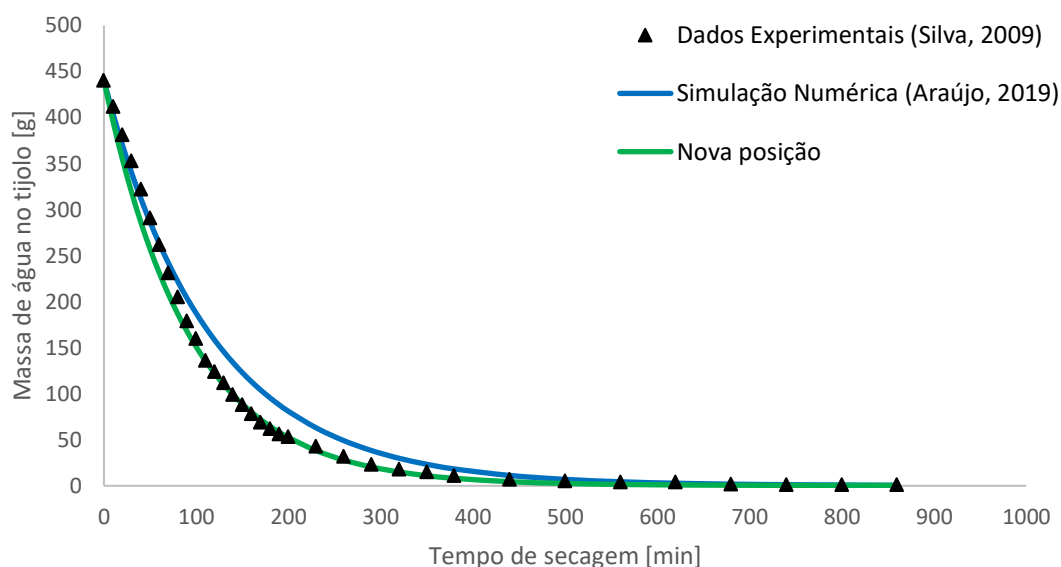


Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 20 Massa de água no interior do tijolo para uma secagem a 80°C



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 21 Massa de água no interior do tijolo para uma secagem a 100°C

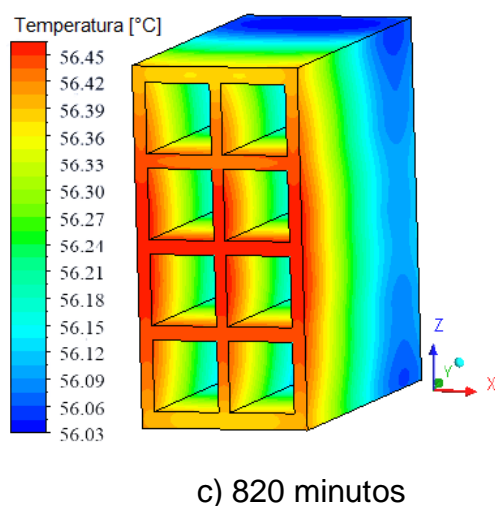
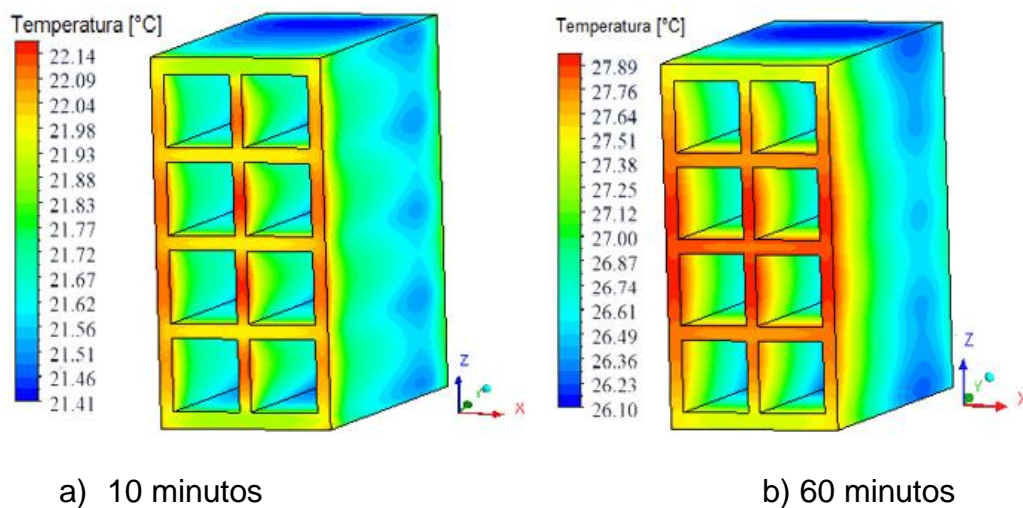
Fonte: Próprio autor (2021).

As figuras 16 a 21 não podem ser comparadas pois os tijolos se encontravam inicialmente com temperaturas distintas, e assim não tem como comparar a cinética de aquecimento de uma temperatura com a outra.

4.2. Campo de Temperatura no Tijolo

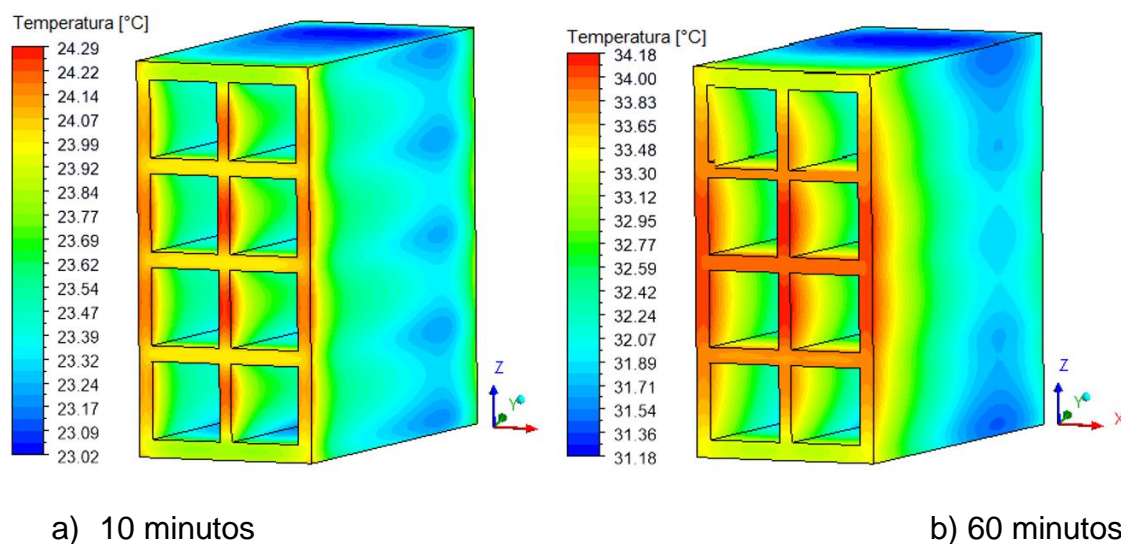
A avaliação dos campos de temperatura e os campos de teor de umidade, só é possível quando há simulação numérica do domínio sólido no tijolo acrescida do domínio fluido, referente ao ar de secagem. Para uma análise térmica apropriada, os campos de temperatura na superfície do tijolo podem ser visualizados nas Figuras de 22 a 24.

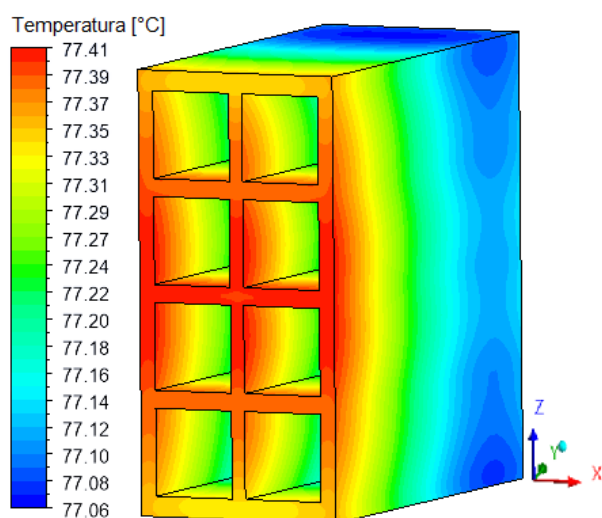
Figura 22 Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 60°C



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 23 Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 80°C

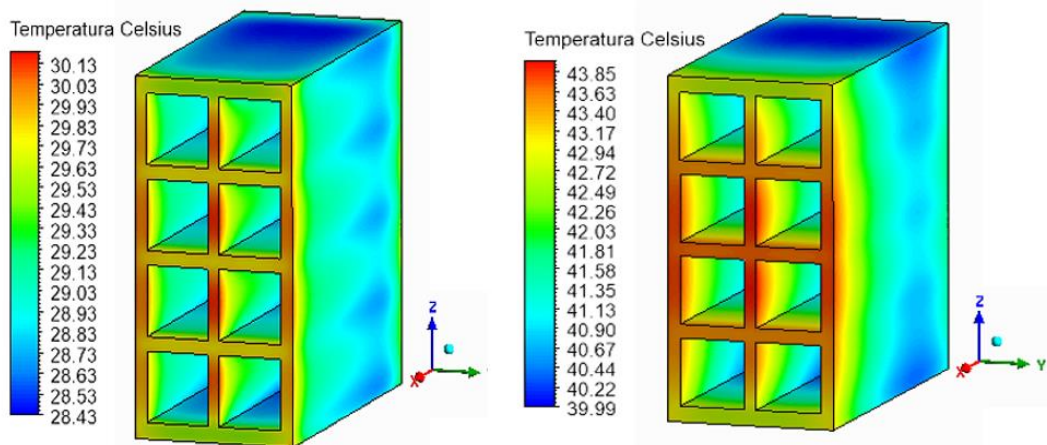




c) 900 minutos

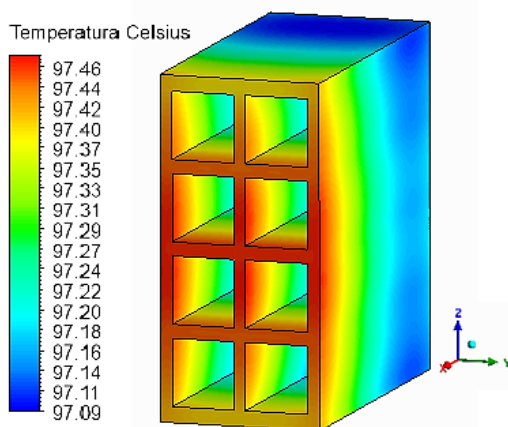
Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 24 Campo de temperatura na superfície do tijolo para a secagem a 100°C



a) 10 minutos

b) 60 minutos



c) 860 minutos

Fonte: Próprio autor (2021).

Pode-se verificar que a variação de temperatura nesta área é pequena, o que pode diminuir a influência da secagem irregular, reduzindo assim os defeitos do material na etapa de queima.

Os resultados mostram que a maior variação de temperatura ocorre sempre na primeira hora do processo. Observa-se que para a temperatura de 60°C obtém-se $\Delta T_{\text{máx}}$ de 56,45°C; para a temperatura de 80°C obtém-se $\Delta T_{\text{máx}}$ de 77,41 e para a temperatura de 100°C essa mudança foi de 97,46 °C.

Pode ser observado que o vértice do lado direito do tijolo aquece mais rápido em comparação com as outras áreas, o que indica que não é apropriado assumir uma temperatura constante em uma superfície sólida.

Devido a direção do fluxo de ar (da direita para esquerda), o interior do tijolo permanece mais frio do que os demais durante todo o processo de secagem. Este aquecimento assimétrico indica que a posição do material na estufa afeta diretamente o gradiente de temperatura, que por sua vez afeta o gradiente de umidade.

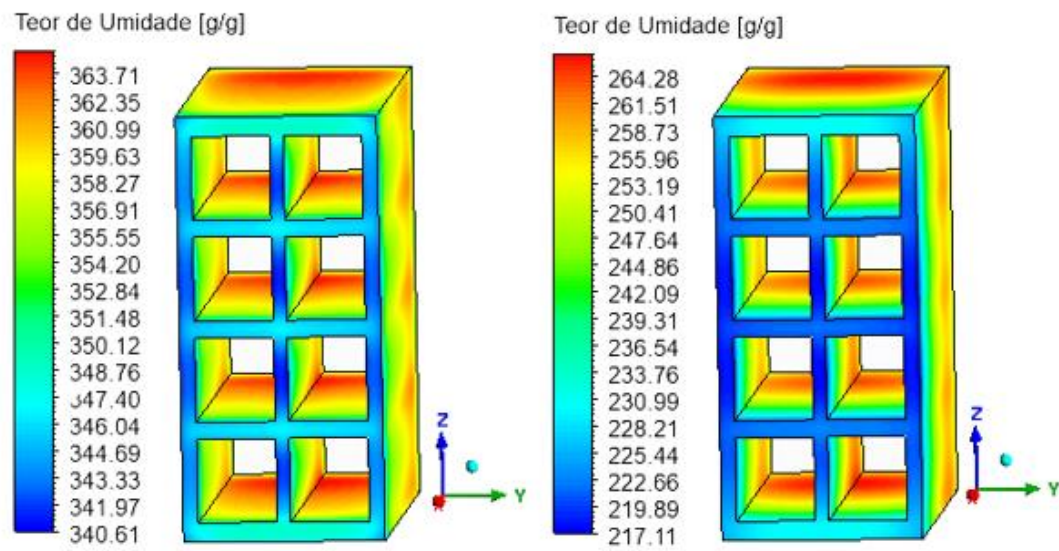
Portanto pode-se esperar que uma simples mudança na posição do tijolo na estufa mude completamente o comportamento da temperatura da superfície sólida.

É importante ressaltar que o gradiente de alta temperatura causado pela secagem descontrolada pode causar diversos tipos de defeitos nos tijolos, como: trincas, deformações, fissuras, entre outros. Esses problemas podem ocorrer durante o uso, como condições de ar seco, altas temperaturas e velocidades e umidade relativamente baixa. Os defeitos gerados durante o processo de moldagem não foram considerados.

4.3. Campo do Teor de Umidade no Tijolo

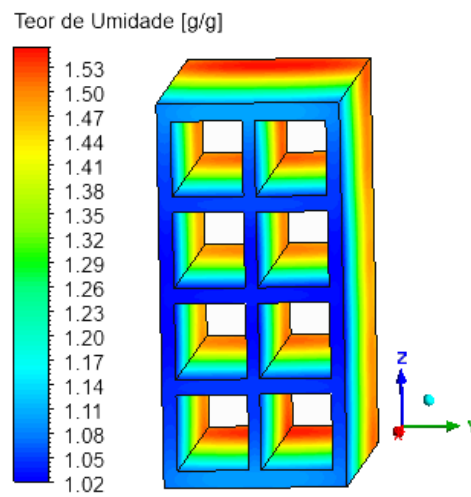
A direção do fluxo de ar afeta diretamente a distribuição de umidade na superfície do material durante o processo de secagem. Este efeito só pode ser estudado em simulações numéricas que incluam o ambiente externo do domínio sólido/poroso. Para verificar a distribuição da umidade na superfície do tijolo, o campo de teor de umidade foi apresentado de acordo com as temperaturas de 60, 80 e 100°C, respectivamente nas Figuras de 25 a 27.

Figura 25 Campo de Teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 60°C



a) 10 minutos

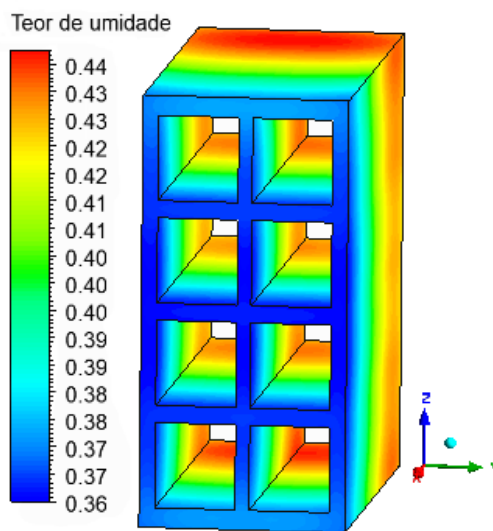
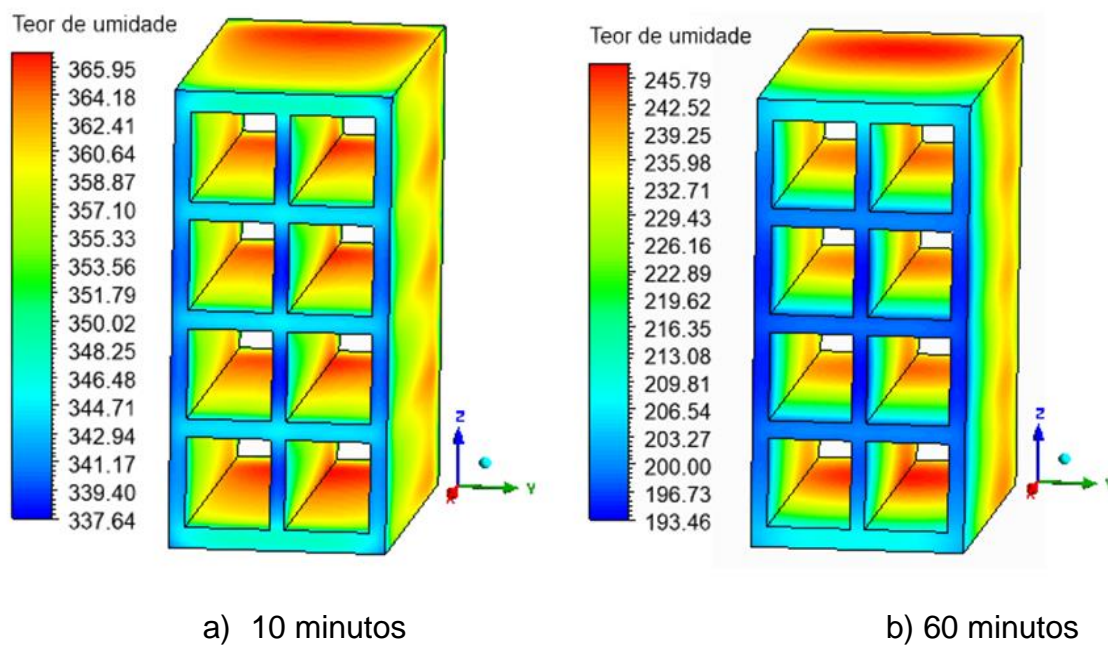
b) 60 minutos



c) 820 minutos

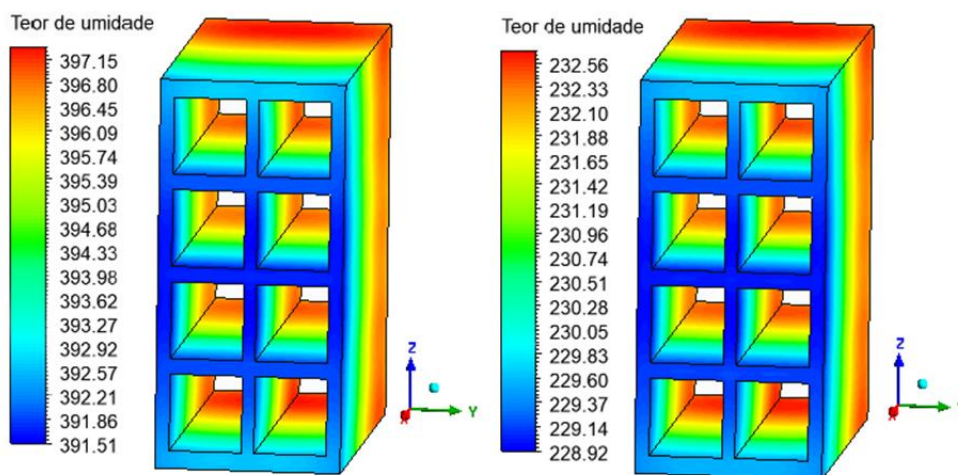
Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 26 Campo de Teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 80°C



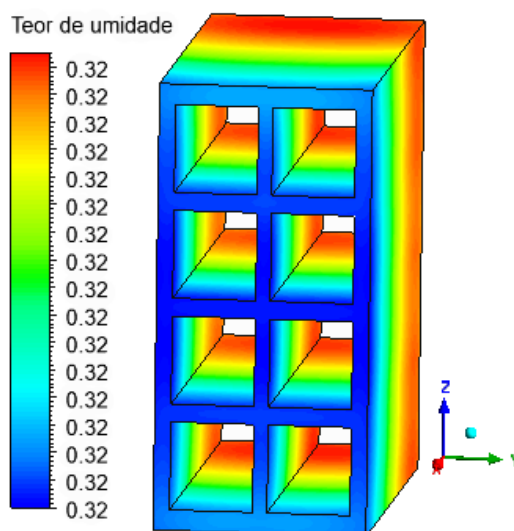
Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 27 Campo de Teor de umidade na superfície do tijolo para a secagem a 100°C



a) 10 minutos

b) 60 minutos



c) 860 minutos

Fonte: Próprio autor (2021).

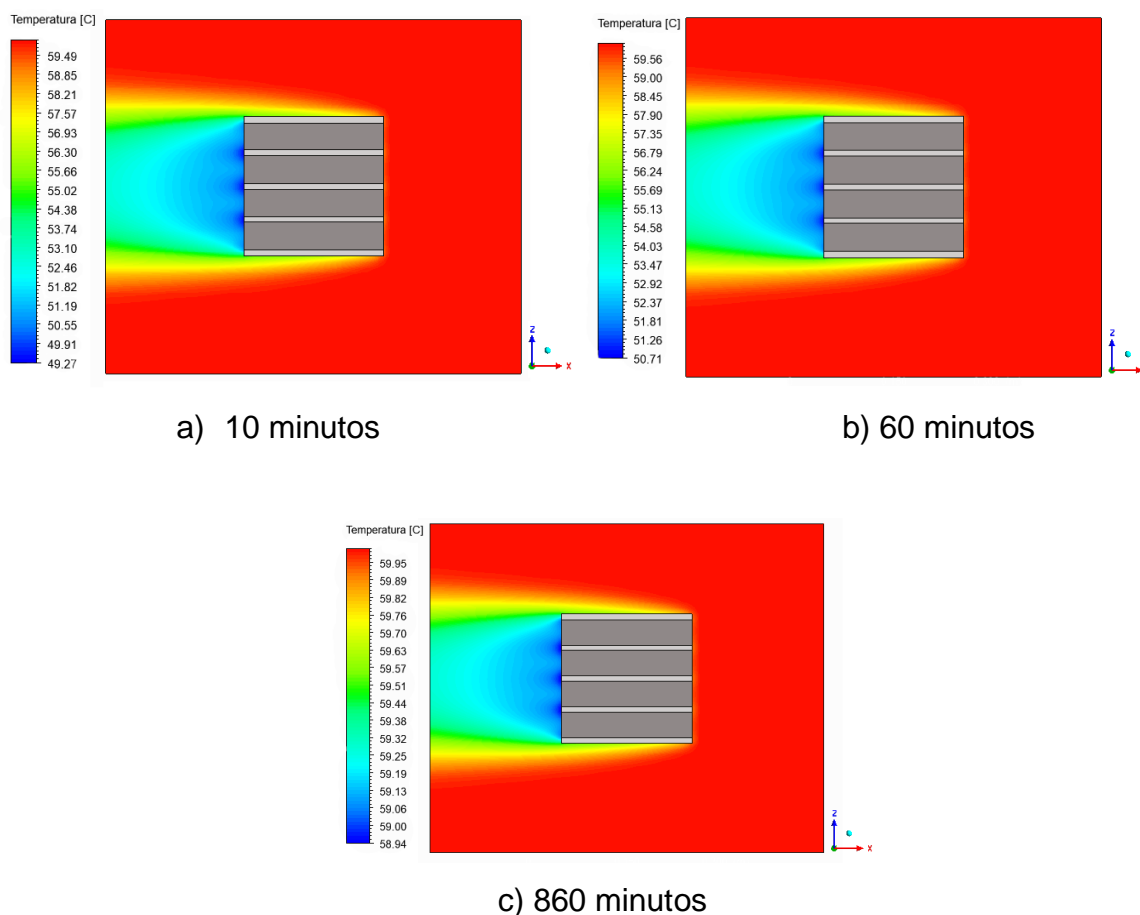
Como o fluxo de ar de secagem ocorre da direita para a esquerda, observa-se que os vértices superior e inferior do lado direito do tijolo (ou seja, o lado que está diretamente em contato com o ar seco) secam mais rápido. Se a prateleira, onde os tijolos são colocados estivesse na simulação, seria esperado que o vértice superior no lado direito do tijolo secasse mais rápido que o vértice inferior à direita porque o ar será mais lento ao redor da área inferior.

Ressalta-se também que a superfície que caracteriza a área vazada do tijolo cerâmico permanece ainda mais úmida que as demais superfícies, em tópicos posteriores será observado que isso ocorre devido ao baixo fluxo de ar nesta área quando comparada com as demais regiões da estufa. Essa diferença de umidade pode ser sentida ao longo do processo de secagem.

4.4. Campo de Temperatura do Ar

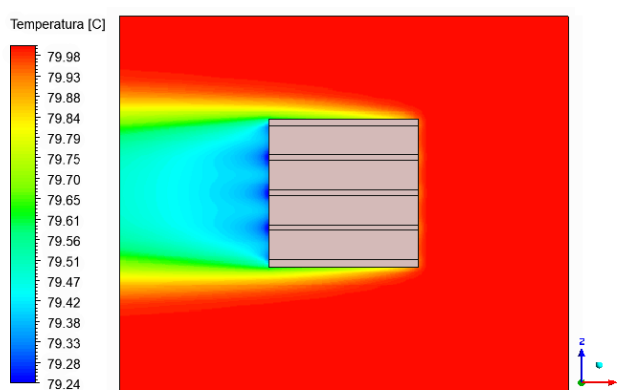
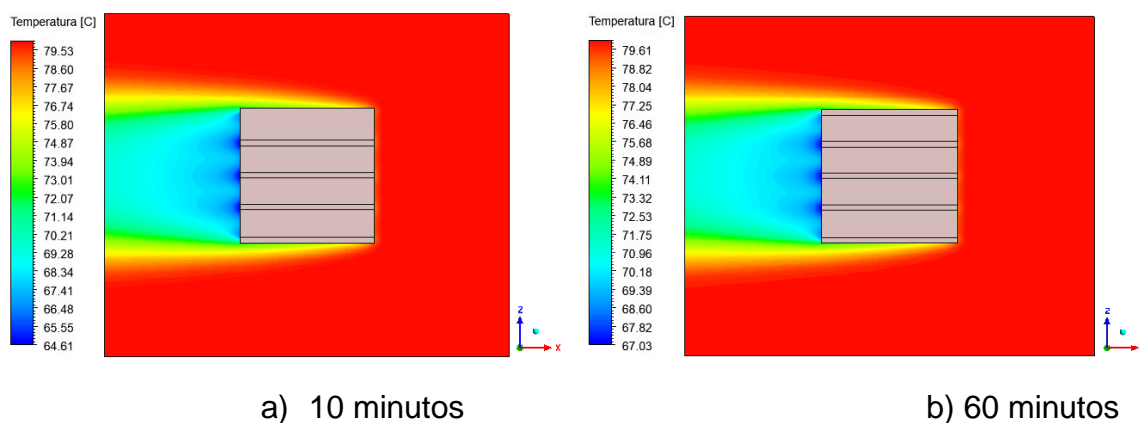
As Figuras de 28 a 30 apresentam a distribuição da temperatura do ar no interior da estufa, no plano XZ, sob diferentes tempos e condições de secagem. Deve-se observar que o ar flui da direita para esquerda. Também há simetria entre as partes superior e inferior do plano XZ.

Figura 28 Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C.



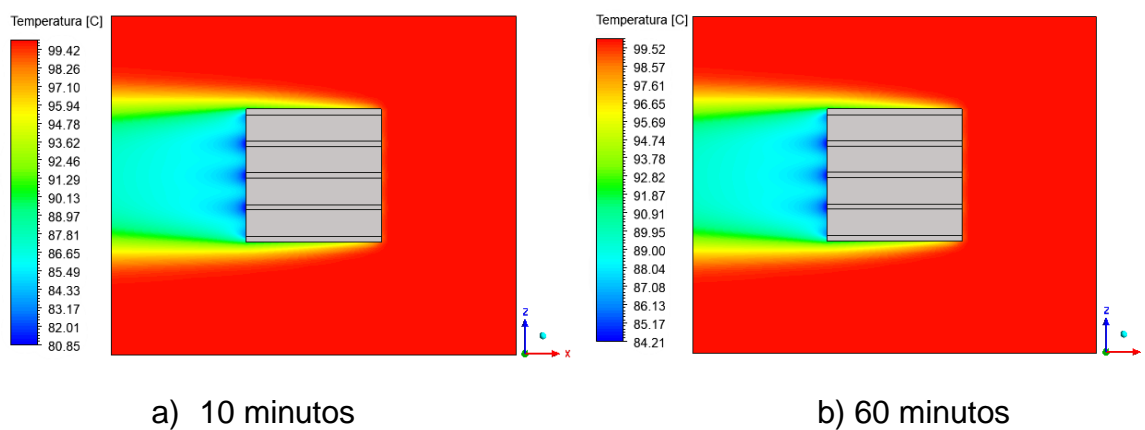
Fonte: Próprio autor (2021).

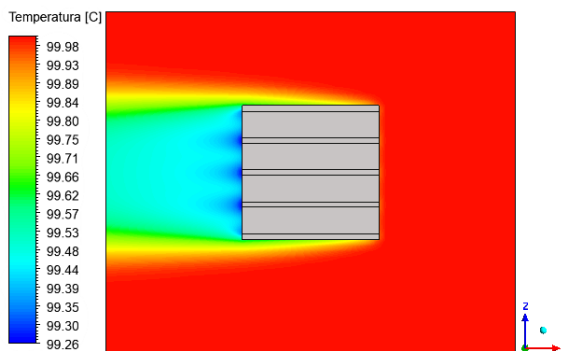
Figura 29 Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 30 Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C





c) 860 minutos

Fonte: Próprio autor (2021).

Pode-se perceber que ocorre a transferência de calor por meio de um processo espontâneo do ar em alta temperatura para o tijolo com temperatura mais baixa. Quando aquecido em estufa, o ar quente transfere calor para o tijolo cerâmico e, à medida que passa pelo material, sua temperatura cai ligeiramente, principalmente próximo a superfície do tijolo cerâmico e na camada limite térmica.

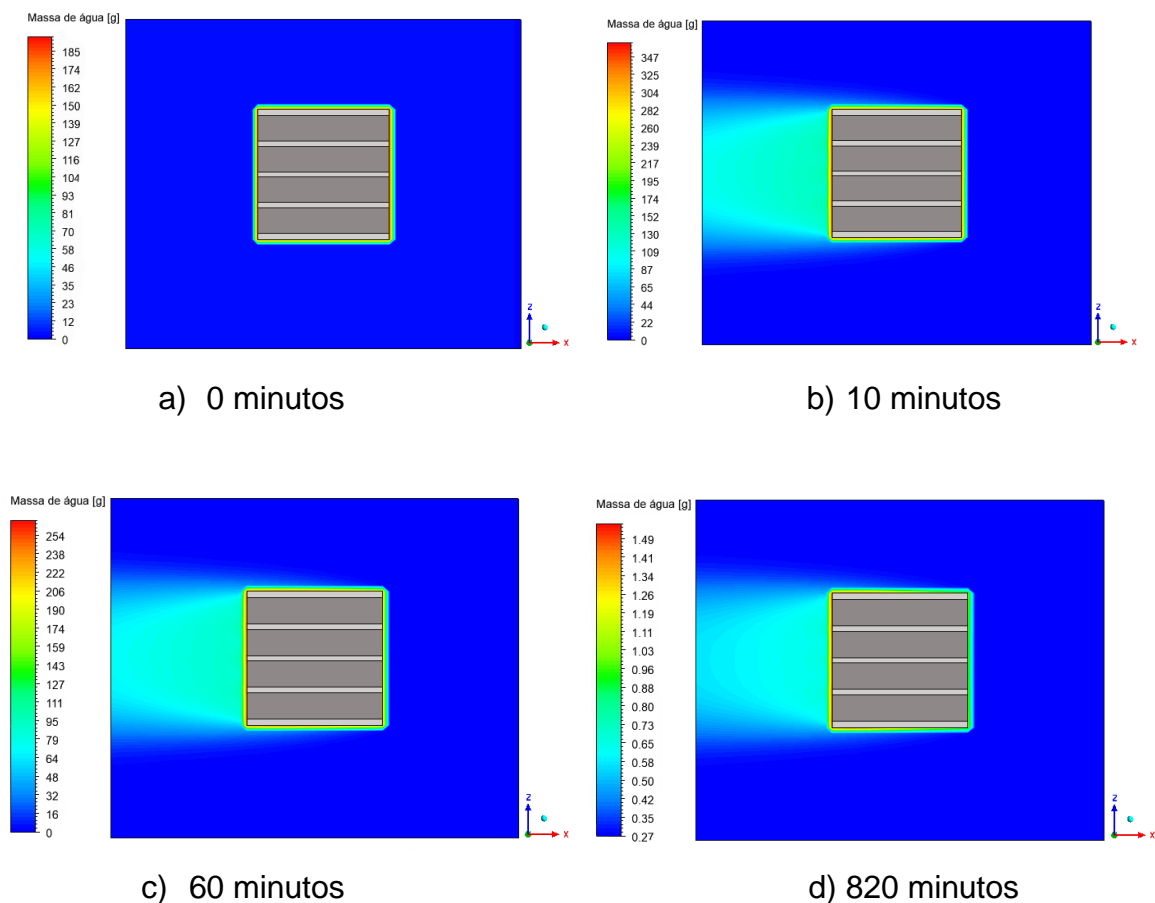
A maior mudança de temperatura ocorreu na baixa temperatura do tijolo, o tempo de secagem inicial em qualquer temperatura de ar seco. Pode-se observar também que o maior gradiente de temperatura ocorre logo próximo à superfície do tijolo, correspondendo a camada de confinamento térmico.

4.5. Campo de Massa de Água

As Figuras 31 a 33 representam o campo de qualidade da água no ar da estufa sob diferentes tempos e condições de secagem.

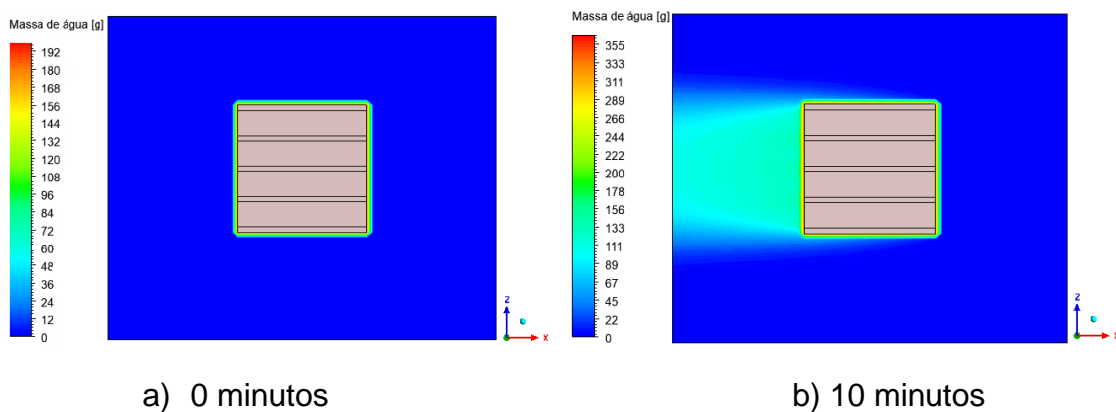
Observe que no momento inicial de secagem, com $t = 0$ minutos, o campo de massa é uniforme e contém apenas uma massa igual à umidade absoluta do ar seco. Ao longo do processo, percebeu-se que quando o ar passou pelos tijolos, ele transportaria uma grande quantidade de água perdida do material. Isso pode ser claramente observado pela tonalidade no campo de massa.

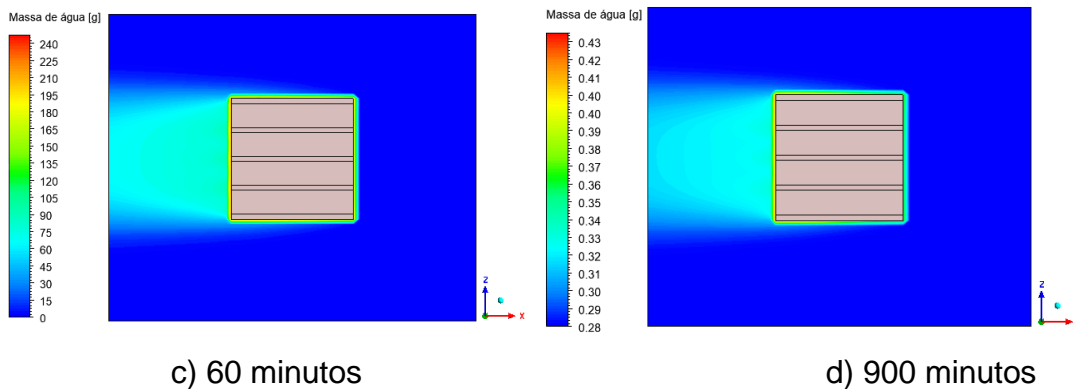
Figura 31 Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 60°C



Fonte: Próprio autor (2021).

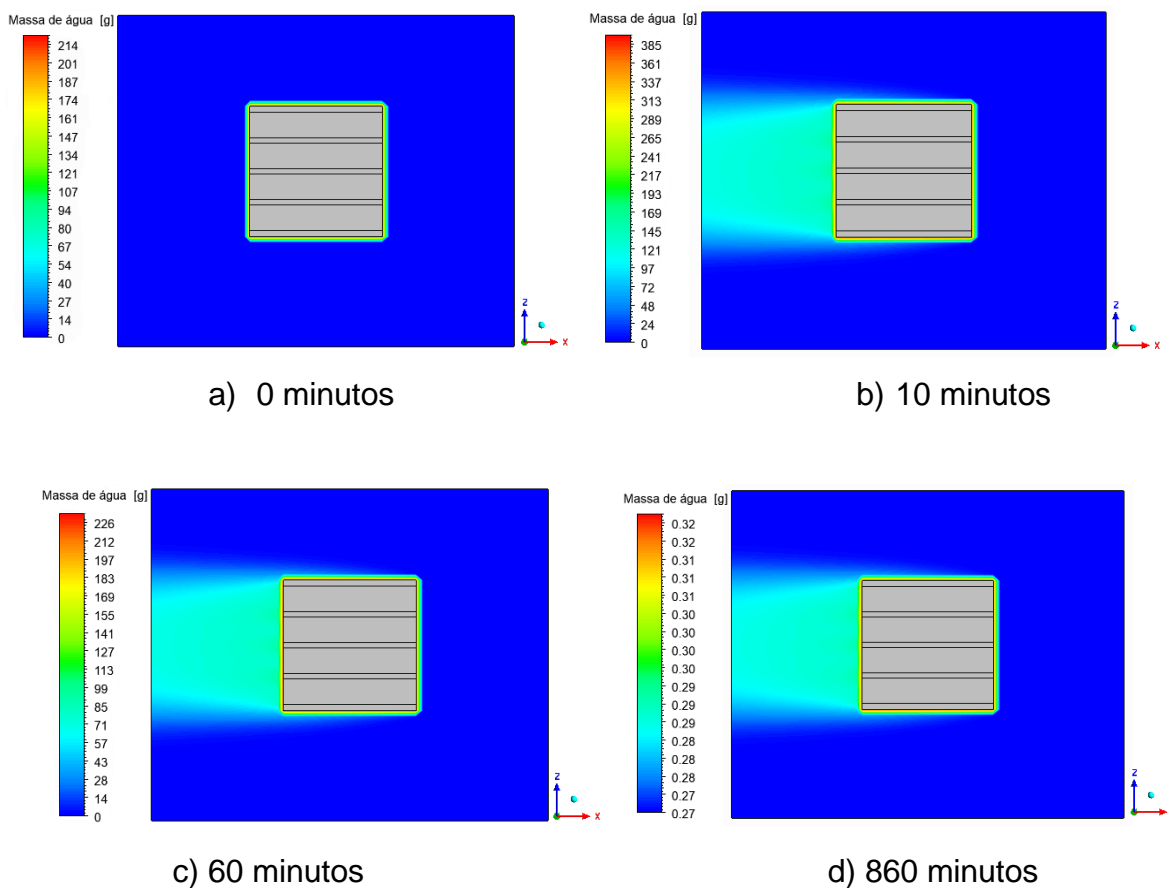
Figura 32 Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 80°C





Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 33 Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para a secagem a 100°C



Fonte: Próprio autor (2021).

4.6. Análise econômica

A potência da estufa utilizada no processo experimental de secagem (FANEM mod. 320E) é de aproximadamente 2000W. Considerando uma utilização do secador 24hs por dia e no período de 300 dias ao longo do ano, o consumo energético será de 14.400 KW por ano.

Considerando que o valor do R\$/kWh para indústria está de R\$ 0,51708 (Energisa, 2021), o gasto anual para manter a estufa funcionando é de aproximadamente R\$ 7445,95.

A partir dos dados coletados nas simulações realizadas para um tijolo, tendo em vista que a posição do tijolo afeta diretamente o tempo de secagem, da mudança na posição pode-se obter uma redução nos custos a nível de energia elétrica.

Comparando o tempo de secagem do tijolo cerâmico em estudo com o utilizado por Araújo (2019), observou-se uma redução nos tempos de secagem de cada tijolo. Nas temperaturas de 60, 80 e 100°C podem ser verificados as evoluções temporais fazendo-se um comparativo entre a simulação numérica e a nova posição apresentado no Anexo B.

A partir dessa redução, fez-se os cálculos de economia de energia em kWh e o valor a ser pago pela energia elétrica em vigor para o setor industrial. Tomando-se os dados de economia de energia, calculou-se a economia em R\$ para cada tijolo cerâmico seco, conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 Economia energética na secagem do tijolo cerâmico vazado industrial

	Temperatura (°C)		
	60	80	100
Redução de tempo em relação a Araújo (2019) (h)	3,27	3,00	3,00
Potência da estufa (W)	2000	2000	2000
Consumo economizado (kWh)	6,53	6,00	6,00
Consumo (R\$/KWh) industrial	3,38	3,10	3,10

Foi possível verificar que a mudança de posição do material cerâmico na estufa reduziu o tempo de secagem e, conseqüentemente, maior será a produção considerando o mesmo gasto energético.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi possível estudar a modelagem matemática do fenômeno de transferência de calor e massa em tijolo cerâmico com fluxo em direção aos orifícios vazados, fazendo-se um comparativo com dados experimentais e da literatura.

Foi estudado o efeito da posição do tijolo dentro da estufa com objetivo de demonstrar características importantes do comportamento da temperatura, massa de água, aplicando para tantas comparações experimentais e computacionais oriundas de simulações realizadas pelo *software* CFX.

Pode-se concluir que a posição do tijolo dentro da estufa afeta diretamente a sua secagem, em comparações realizadas com outros trabalhos, com a nova posição o tijolo secou mais rápido.

Foi possível verificar redução no tempo de secagem quando se mudou a posição do tijolo e, conseqüentemente, maior foi a produção considerando o mesmo gasto energético.

REFERÊNCIAS

ABCERAM. **Informações Técnicas - Processos De Fabricação**. Disponível em: <<https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>>. Acesso em 20 de novembro de 2020.

AGRAWAL, K. K.; MISRA, R.; AGRAWAL, G. D. **CFD simulation study to evaluate the economic feasibility of backfilling materials for ground-air heat exchanger system**. Geothermics, Volume 90, February 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.

ANICER. **Associação Nacional Da Industria Da Cerâmica**. Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/>> Acesso em 20 de novembro de 2020.

ANSYS Help Viewer version 15.0. (2013)

ARAÚJO, M. de V. **Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos industriais**. 2019. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2019

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

BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia**. 2 ed. São Paulo: Contexto, 2004, 389p.

Bela vista tijolos. Disponível em: <<http://www.belavistatijolos.com.br> > Acesso em 12 de janeiro de 2021.

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

CEGAZA. Cerâmica Cegaza. Disponível em: <<http://www.cegaza.com.br/quemsomos.html> >. Acesso em: 01 de Junho de 2021.

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

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

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

ENERGISA, Energisa Paraíba. Intranet, 2021. <
<https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>>

FANEM. Manual de Usuário. ESTUFA DE SECAGEM COM CIRCULAÇÃO DE AR FORÇADA MODELO 320. FANEM São Paulo, Brasil, 2007.

GOMEZ, R. S.; MAGALHÃES, H. L. F.; PORTO, T. R. N.; LIMA, E. S.; SANTANA, R. A. C.; GOMES, K. C.; LIMA, W. M. P. B.; LIMA, A. G. B. **Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão**. Research, Society and Development, v. 9, n. 11, 2020.

IDM, Instituto do Desenvolvimento da Mineração. **Argila**. 13/08/2020. Disponível em: <<https://idmbrasil.org.br/item/argila/119/>>. Acesso em: 01 de junho de 2021.

INCROPERA, F. P., AND DEWITT, D. P., 2002, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Fifth Edition, John Wiley & Sons.

KAWAGUTI, W. M. **Estudo do comportamento térmico de fornos intermitentes tipo "paulistinha" utilizados na indústria de cerâmica vermelha**. 2004. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

LUIZ, Marcia Ramos. Estudo teórico e experimental de secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum*). 2012. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

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.

MACEDO, Rafael Feliciano de et al. **Secagem contínua de argila bentonita em secador rotativo industrial: modelagem, simulação e experimentação**. 2016.

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

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

REFAEY, H. A.; ALHARTHI, M. A.; SALEM, M. R.; ABDEL-AZIZ, A. A.; ABDELRAHMAN, H. E.; KARALI, M. A. **Numerical investigations of convective heat transfer for lattice settings in brick tunnel Kiln: CFD simulation with experimental validation**. Thermal Science and Engineering Progress, v. 24, 1 August 2021.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas**. 2a ed., São Paulo, Edgard Blucher/EDUSP, 1989. v 2.

SANTOS, R. S. **Estudo do processo de secagem de blocos cerâmicos estruturais: modelagem e simulação**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 216f, 2019.

SILVA, A. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, Antonio Gilson Barbosa. **Estudo analítico de secagem de placas cerâmicas usando o método integral baseado em Galerkin e condição de contorno de Dirichlet**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 4, n. 2, 2009.

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

SINDICER. O SETOR CERÂMICO - DADOS DO SETOR, 2021. Disponível em: <http://www.sindicerp.com.br/setorceramico>. Acesso em: Junho de 2021.

VIJAYANA, D. S.; MOHAN, A.; REVATHY, J.; PARTHIBAN, D.; VARATHARAJAN, R. **Evaluation of the impact of thermal performance on various building bricks and blocks: A review**. Environmental Technology & Innovation, Volume 23, August 2021.

ANEXO A

A.1. Secagem a 60°C

a) Dados:

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

b) Cálculos para as condições de contorno:

- Pressão de vapor:

$$P_{vapor} = U_{rel} P_{vapor}^{sat} = 0,1358 \times 0,1994 \text{ bar} = 0,0271 \text{ bar} \quad (\text{A.1})$$

- Razão de mistura (umidade absoluta):

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0,622 \frac{0,0271 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,0271 \text{ bar}} = 0,0171 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg ar seco}} \quad (\text{A.2})$$

- Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa:

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

- Vazão mássica de ar seco:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_f W_{ar\ seco} = 1,060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1,589 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 15,89 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{A.4})$$

- Vazão mássica de água:

$$\dot{m}_{\text{água}} = \omega \cdot \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0171 \times 15,89 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,271719 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{A.5})$$

c) Cálculos para as condições iniciais:

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_f V_{ar\ seco} = 1,060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,149 \text{ m}^3 = 0,157 \text{ kg} = 157 \text{ g} \quad (\text{A.6})$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{\text{água}} = \omega \cdot m_{ar\ seco} = 0,0171 \times 157 \text{ g} = 2,68886 \text{ g} \quad (\text{A.7})$$

A.2. Secagem a 80°C

a) Dados:

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

b) Cálculos para as condições de contorno:

- Pressão de vapor:

$$P_{vapor} = U_{rel} P_{vapor}^{sat} = 0,0468 \times 0,4739 \text{ bar} = 0,0222 \text{ bar} \quad (\text{A.8})$$

- Razão de mistura (umidade absoluta):

$$\omega = 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0,622 \frac{0,4739 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,4739 \text{ bar}} = 0,0139 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}} \quad (\text{A.9})$$

- Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa:

$$W_{ar\ seco} = U_{ar\ seco} A_{estufa} = 0,08 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ m}^2 = 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{A.10})$$

- Vazão mássica de ar seco:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \rho_f W_{ar\ seco} = 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1,999 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 19,99 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{A.11})$$

- Vazão mássica de água:

$$\dot{m}_{água} = \omega \cdot \dot{m}_{ar\ seco} = 0,0139 \times 19,99 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,27827 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{A.12})$$

c) Cálculos para as condições iniciais:

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar\ seco} = \rho_f V_{ar\ seco} = 1,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,149 \text{ m}^3 = 0,149 \text{ kg} = 149 \text{ g} \quad (\text{A.13})$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{água} = \omega \cdot m_{ar\ seco} = 0,0139 \times 149 \text{ g} = 2,06730 \text{ g} \quad (\text{A.14})$$

A.3. Secagem a 100°C

a) Dados:

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

b) Cálculos para as condições de contorno:

- Pressão de vapor:

$$P_{vapor} = U_{rel} P_{vapor}^{sat} = 0,018 \times 1,0140 \text{ bar} = 0,0183 \text{ bar} \quad (\text{A.15})$$

- Razão de mistura (umidade absoluta):

$$\begin{aligned} \omega &= 0,622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0,622 \frac{0,0183 \text{ bar}}{1,01325 \text{ bar} - 0,0183 \text{ bar}} \\ &= 0,0114 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}} \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

- Vazão volumétrica de ar seco na entrada da estufa:

$$W_{ar \text{ seco}} = U_{ar \text{ seco}} A_{estufa} = 0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ m}^2 = 0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{A.17})$$

- Vazão mássica de ar seco:

$$\dot{m}_{ar \text{ seco}} = \rho_f W_{ar \text{ seco}} = 0,946 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2,365 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 23,65 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{A.18})$$

- Vazão mássica de água:

$$\dot{m}_{água} = \omega \cdot \dot{m}_{ar \text{ seco}} = 0,0114 \times 23,65 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 0,26984 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad (\text{A.19})$$

c) Cálculos para as condições iniciais:

- Massa de ar seco no interior da estufa:

$$m_{ar \text{ seco}} = \rho_f V_{ar \text{ seco}} = 0,946 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,149 \text{ m}^3 = 0,141 \text{ kg} = 141 \text{ g} \quad (\text{A.20})$$

- Massa de água no interior da estufa:

$$m_{água} = \omega \cdot m_{ar \text{ seco}} = 0,0114 \times 141 \text{ g} = 1,60376 \text{ g} \quad (\text{A.21})$$

ANEXO B

Tabela 4 B.1: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 60°C.

	Dados	Simulação	Nova		Dados	Simulação	Nova
	Experimentais	Numérica	Posição		Experimentais	Numérica	Posição
t [min]	m _{água} [g]	m _{água_tijolo} [g]	m _{água_tijolo} [g]	t[min]	m _{água} [g]	m _{água_tijolo} [g]	m _{água_tijolo} [g]
0	386	386	386	220	106	115	79
10	373	362	359	230	99	109	73
20	358	342	334	240	93	104	68
30	342	322	310	250	87	98	64
40	326	305	289	260	81	93	59
50	312	288	268	270	77	89	55
60	297	272	250	280	71	84	51
70	282	258	232	290	67	80	48
80	269	244	216	300	63	76	44
90	254	231	201	310	60	72	41
100	239	219	187	340	50	61	33
110	223	207	174	370	42	52	27
120	211	196	162	400	35	45	22
130	197	186	151	430	31	38	18
140	183	176	140	460	25	33	14
150	168	167	130	490	22	28	12
160	159	158	121	520	20	24	9
170	149	150	113	580	15	18	6
180	138	142	105	640	12	13	4
190	129	135	98	700	9	10	3
200	122	128	91	760	7	7	2
210	114	122	85	820	7	5	1

Tabela 5 B.2: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 80°C.

Dados Experimentais				Simulação Numérica				Nova Posição			
Dados Experimentais		Simulação Numérica		Nova Posição		Dados Experimentais		Simulação Numérica		Nova Posição	
t [min]	m _{água} [g]	m _{água_tijolo} [g]	m _{água_tijolo} [g]	t [min]	m _{água} [g]	m _{água_tijolo} [g]	m _{água_tijolo} [g]	t [min]	m _{água} [g]	m _{água_tijolo} [g]	m _{água_tijolo} [g]
0	394	394	394	210	59	87	60				
10	377	366	359	220	54	81	55				
20	354	340	328	230	48	76	50				
30	329	316	300	240	44	70	46				
40	303	294	274	250	41	66	42				
50	278	274	251	260	37	61	38				
60	255	255	229	270	34	57	35				
70	230	237	209	300	26	46	27				
80	194	221	191	330	22	37	21				
90	183	205	175	360	17	30	16				
100	167	191	160	390	14	25	12				
110	150	178	146	420	10	20	9				
120	136	166	134	450	10	16	7				
130	122	154	122	480	8	13	6				
140	109	143	112	540	6	9	3				
150	100	134	102	600	4	6	2				
160	91	124	93	660	2	4	1				
170	84	116	85	720	2	3	1				
180	76	108	78	780	1	2	1				
190	70	100	71	840	1	1	0				
200	65	94	65	900	1	1	0				

Tabela 6 B.3: Evolução temporal da massa de água no tijolo para secagem a 100°C.

Dados		Simulação	Nova	Dados		Simulação	Nova
Experimentais		Numérica	Posição	Experimentais		Numérica	Posição
t	m _{água_tijolo}		m _{água_tijolo}	t	m _{água_tijolo}		m _{água_tijolo}
[min]	m _{água} [g]	[g]	[g]	[min]	m _{água} [g]	[g]	m _{água_tijolo} [g]
0	440	440	440	180	62	96	65
10	412	403	395	190	56	88	58
20	381	370	355	200	53	81	52
30	353	340	319	230	43	63	38
40	322	312	286	260	32	49	28
50	291	286	257	290	23	38	20
60	262	263	231	320	18	30	15
70	231	242	208	350	15	23	11
80	205	222	187	380	11	18	8
90	179	204	168	440	7	11	4
100	160	187	151	500	5	7	2
110	136	172	136	560	4	4	1
120	124	158	122	620	4	3	1
130	112	145	110	680	2	2	1
140	99	134	99	740	1	1	0
150	88	123	89	800	1	1	0
160	78	113	80	860	1	1	0
170	69	104	72				