



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

ROMEU DA SILVA

**SECAGEM DE TELHAS: UMA ANÁLISE NÚMERICA VIA FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

CARAÚBAS

2022

ROMEU DA SILVA

**SECAGEM DE TELHAS: UMA ANÁLISE NUMÉRICA VIA FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à
Universidade Federal Rural do Semiárido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e tecnologia

Orientador: Profa. Dra. Rosilda Sousa Santos

CARAÚBAS

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S581s Silva, Romeu.
SECAGEM DE TELHAS: UMA ANÁLISE NUMÉRICA VIA
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL / Romeu Silva. -
2022.
61 f. : il.

Orientador: Rosilda Sousa Santos.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2022.

1. Modelagem. 2. Umidade. 3. Temperatura. 4.
Velocidade. 5. Calor. I. Sousa Santos, Rosilda,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ROMEU DA SILVA

**SECAGEM DE TEHAS: UMA ANÁLISE NUMÉRICA VIA FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

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

Defendida em: 15 / 06 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

ROSILDA SOUSA

SANTOS: [REDACTED]

Assinado de forma digital por ROSILDA SOUSA SANTOS: [REDACTED]
Dados: 2022.06.23 10:04:43 -03'00'

Profª. Dra. Rosilda Sousa Santos (UFERSA)
Orientadora

Rejane Ramos
Dantas

Rejane Ramos Dantas
2022.06.20 22:48:18-03'00'
PE11.2.1

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

DIEGO DAVID SILVA
DINIZ: [REDACTED]

Assinado digitalmente por DIEGO DAVID SILVA DINIZ: [REDACTED]
DN: CN=DIEGO DAVID SILVA DINIZ, OU=UFERSA -
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2022.06.19 18:26:04-03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.2

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre presente em todos os momentos de minha vida, me auxiliando e me dando forças para superar todos os desafios que passaram e que estão por vir. Sem Ele, nada disto seria possível. A toda a minha família por todo o suporte, carinho e atenção em todos os momentos da minha vida. Especialmente aos meus pais. Aos amigos que obtive nesse período de graduação, em especial os meus companheiros de quarto, que me auxiliaram com tudo que eu precisava, pelos momentos de descontração, auxílio e reflexão.

Agradeço a Profa. Dra. Rosilda Sousa Santos pela excelente orientação e grandes ensinamentos e compreensão desde o começo, aos membros da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

RESUMO

Atualmente diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas sobre secagem de materiais cerâmicos, sendo que a grande maioria são realizadas de forma experimental. Este processo requer altos investimentos e consumo de energia, resultando em elevados custos para as empresas do setor. O processo de secagem pode ser definido como uma operação unitária que consiste na remoção de água dos materiais porosos, através da transferência de calor. Então, visando um melhor custo benefício, é comum o uso de soluções teóricas que permitem, com relativa facilidade de replicação e baixo custo, alterar condições operacionais e geométricas do secador ou objeto de secagem. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo prever o processo de secagem de uma telha cerâmica em um forno via fluidodinâmica computacional (CFD). Para realização das simulações, foi utilizado o pacote comercial Ansys CFX[®] 22.R1. Para uma temperatura de secagem a 342,85 K, os resultados da cinética de secagem e aquecimento, teor de umidade do produto, velocidade e pressão do ar no forno são mostrados e analisados. Uma comparação entre os dados previstos e experimentais do teor de umidade médio da telha ao longo do processo foi realizada e uma boa concordância foi obtida.

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

ABSTRACT

Currently, several researches have been developed on the drying of ceramic materials, most of which are carried out experimentally. This process requires high investments and energy consumption, resulting in high costs for companies in the sector. The drying process can be defined as a unit operation that consists of removing water from porous materials through heat transfer. So, aiming at a better cost benefit, it is common to use theoretical solutions that allow, with relative ease of replication and low cost, to change operational and geometric conditions of the dryer or drying object. In this sense, this work aims to predict the drying process of a ceramic tile in a kiln via computational fluid dynamics (CFD). To carry out the simulations, the commercial package Ansys CFX® 22.R1 was used. For a drying temperature of 342.85 K, the results of drying and heating kinetics, product moisture content, oven air velocity and pressure are displayed and analyzed. A comparison between predicted and experimental data of the average moisture content of the tile throughout the process was performed and a good agreement was obtained.

Keywords: modelling; humidity; temperature; speed; heat; mass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Produção de cerâmica no Brasil -----	19
Figura 2.2: Amostra de Argila -----	21
Figura 2.30: Corte de uma extrusora de dupla hélice -----	29
Figura 2.41: Passo a passo do processo fluidodinâmico-----	33
Figura 3.1 : Amostra da telha cerâmica utilizada nesta pesquisa -----	34
Figura 3.2: Geometria representativa telha cerâmica no interior da estufa -----	35
Figura 3.3: Representação da malha numérica do domínio telha/estufa. -----	36
Figura 3.4: Direção de escoamento do fluido -----	40
Figura 4.1: teor de umidade da telha em função do tempo de secagem ($T=342,85\text{ K}$) -----	46
Figura 4.2: Planos de análise sobre os domínios fluido e sólido -----	47
Figura 4.3: Campo de temperatura no interior da telha (Plano XY) para a secagem a $342,85\text{ K}$ -----	48
Figura 4.4: Campo de temperatura no interior da telha (Plano ZX) para a secagem a $342,85\text{ K}$ -----	48
Figura 4.5: Campo de temperatura no interior da telha (Plano YZ) para a secagem a $342,85\text{ K}$ -----	49
Figura 4.6: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XY) para secagem a $342,85\text{ K}$. -----	50
Figura 4.7: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano YZ) para secagem a $342,85\text{ K}$. -----	51
Figura 4.8: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano YX) para secagem a $342,85\text{ K}$. -----	52
Figura 4.9: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para secagem a $342,85\text{ K}$. -----	52
Figura 4.10: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano YZ) para secagem a $342,85\text{ K}$. -----	53
Figura 4.11: campo de velocidade do ar no interior da estufa Plano YX para a secagem a $342,85\text{ K}$. -----	54
Figura 4.12: campo de velocidade do ar no interior da estufa Plano YZ para a secagem a $342,85\text{ K}$. -----	55
Figura 4.13: Campo vetorial de ar no interior da estufa plano YZ ($t=10\text{ minutos}$)-----	56
Figura 4.14: Linhas de corrente no interior da estufa plano YZ no instante 10 minutos -----	56

Figura 4.15: Campo de pressão no interior da estufa Plano YZ Para secagem a 342,85 K. -- 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características geométricas telha Lusa -----	23
Tabela 2.2: Características geométricas telha Romana -----	23
Tabela 2.3: Características geométricas telha Marselha-----	24
Tabela 2.4 - Características geométricas telha Canudo-----	25
Tabela 3.1: Dados experimentais relativos à cinética secagem para $T=342,85\text{ K}$. -----	41
Tabela 3.2: Dados usados nas simulações. -----	44
Tabela 3.3: Propriedades físicas e químicas do ar e da argila usadas nas simulações.-----	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica
CFD	Computational Fluid Dynamic (Fluidodinâmica Computacional)
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres

NOMECLATURA

Letras Latinas

hm	Coeficiente de transferência de massa	[m/s]
hc	Coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² . K]
k	Condutividade térmica	[W/ (m.K)]
mo	Massa inicial do produto	[kg]
m(t)	Massa do produto no tempo	[kg]
Ma	Massa de água da telha	[kg]
D	Coeficiente de difusão de massa	
ms	Massa da telha seca	[kg]
m	Massa de água	[kg]
meq	Massa de água na condição de equilíbrio	[kg]
$\bar{M}$	Teor de umidade do produto em base seca	[kg/kg]
Me	Teor de umidade de equilíbrio em base seca	[kg/kg]
Mo	Teor de umidade inicial em base seca	[-]
$\dot{Q}$ conv	Taxa de transferência de calor	[W]
To	Temperatura inicial do produto	[°C]
T*	Temperatura adimensional	[-]
T	Temperatura do ar de secagem	[°C]
Ts	Temperatura na superfície da telha	[°C]
Te	Temperatura de equilíbrio do produto	[°C]
UR	Umidade relativa	[%]
V	Volume da telha	[m ³]
ERMQ	Erro quadrático médio do teor de umidade	[(kg/kg) ²]

Letras Gregas

ρ	Densidade (massa específica)	[kg/m ³]
Δ	Variação	[-]
∇	Divergente	[-]
ω	Umidade absoluta	

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 HISTÓRICO DA CERÂMICA	18
2.2 ARGILA	20
2.2.1 Propriedades da argila	21
2.3 TELHAS CERÂMICAS	22
2.3.1 Tipos de telhas	22
2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO	25
2.5 ESTUDOS EXPERIMENTAIS	32
2.6 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)	32
3 METODOLOGIA	34
3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA FÍSICO	35
3.1.1 O sistema Telha/Estufa	35
3.1.2 Malha numérica	36
3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E EQUAÇÕES GOVERNANTES	37
3.2.1 Equações governantes	37
3.2.2 Secagem de telha cerâmica	37
3.2.3 Secagem de telha cerâmica em estufa	38
3.2.4 Parâmetro mássico do produto	42
3.2.5 Parâmetros de ar de secagem	42
3.3 PROCEDIMENTO NUMÉRICO	44
3.3.1 Estimativa dos coeficientes de transportes	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 DISTRIBUIÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSPORTE DA TELHA	47

4.2	CAMPO DE TEMPERATURA NA TELHA-----	47
4.3	DISTRIBUIÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSPORTE NO AR-----	49
4.3.1	Campo de temperatura do ar-----	49
4.3.2	Campo de massa de água-----	51
4.3.3	Campo de velocidade do ar-----	53
4.3.4	Campo de pressão-----	56
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS-----	58
5.1	CONCLUSÕES-----	58
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS-----	59
	REFERÊNCIAS-----	60

1 INTRODUÇÃO

As primeiras telhas tiveram origem com os avanços acerca da queima da matéria prima a argila e a sua transformação em cerâmica. Em tempos passados, foi descoberto que a argila poderia alterar facilmente sua estrutura, conforme o avanço de sua secagem, ou seja, a argila úmida podia ser modelada com facilidade, endurecendo à medida que a secava. Assim, tornou-se a base para muitos utensílios, armazenamentos e transportes de líquidos e alimentos (ANICER, 2016).

Segundo ANICER (2016), o Brasil conta com quase duas mil fábricas de telhas cerâmicas que estão espalhadas e atendem a todas as regiões. Mensalmente, as empresas são responsáveis pela produção de 1.300 bilhões de peças, que vão dos modelos clássicos aos modernos e incluem opções naturais e coloridas, mais de 90% das coberturas realizadas no País utilizam telhas cerâmicas, que oferecem o melhor conforto térmico e acústico para os ambientes. Além de ser 100% natural, a telha tem maior durabilidade quando comparada com os demais produtos com a mesma função estrutural (ANICER, 2016).

A fabricação de telhas cerâmica compreende diversas fases: exploração das jazidas, o tratamento prévio das matérias primas, a homogeneização, secagem e a queima, na fabricação de telhas, água e adicionada a argila antes da conformação até que um teor de umidade de 20-40% (base seca) seja obtido posteriormente esse material deve ser secado seguidamente ir para o forno para o processo de queima (NASCIMENTO, 2018).

O processo de secagem é um dos processos que mais consomem energia e de maior complexidade na produção de materiais cerâmicos ficando atrás somente do processo de queima, sendo assim é necessário a criação de novas ferramentas e avanço das ferramentas já existentes para diminuição de gastos energéticos e otimização do tempo necessário, para que se obtenha a umidade necessária (ARAUJO, 2019).

Durante o processo de secagem, sem o devido controle, elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do sólido podem causar defeitos irreversíveis no mesmo, como aparecimento de trincas, deformações e empenamentos. Isto gera perda da qualidade do produto final, ou sua perda total, diminuindo a produtividade do processo e aumentando custos operacionais (NASCIMENTO, 2018).

Segundo Cruz, (2016) o processo de fabricação de telhas cerâmicas quase não sofreu alteração com o passar do tempo, sendo que essa tecnologia foi implementada nas décadas de 1950 e 1960. A partir daí, houve a necessidade na otimização do processo de produção, tendo em vista um dos principais desafios o processo de secagem.

O processo de secagem faz parte de uma série de atividades, das quais as indústrias alimentícia, farmacêutica e cerâmica estão entre as mais importantes na secagem de matérias porosas e seu processo de produção, com uma ressalta a produção de materiais cerâmicos, neste processo a água deve ser retirada antes do processo de queima (CRUZ, 2016).

A secagem utiliza o processo de transferência de calor condutivo ou convectivo que tem o intuito de diminuir componentes químicos presentes em diversos tipos de materiais sintéticos ou naturais, sendo o princípio da secagem semelhante a outros processos, como evaporação. A secagem é conhecida como um dos processos, mas utilizado, onde o calor sensível é transferido para material passando sobre a superfície até evapora a umidade (SANTOS, 2018).

Assim, visando um desenvolvimento tecnológico nos estudos de simulação numérica, capaz de reproduzir os experimentos que são realizados em laboratórios, capaz de substituir a função dos secadores e de processos de secagem sem que seja necessário construir um protótipo, onde o estudo poder ser realizado em escala real, podendo eliminar a sensibilidade da temperatura e maior umidade eliminando incertezas de testes experimentais (ARAUJO, 2019).

Neste contexto, a presente pesquisa terá como objetivo otimizar o processo de secagem de telhas cerâmicas através da simulação numérica via Dinâmica dos fluidos computacionais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar, através da simulação numérica, o processo de secagem considerando os domínios sólidos e fluido (telha /estufa)

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar uma nova metodologia sobre o estudo de secagem de telhas cerâmicas através da simulação numérica, considerando os domínios sólidos e fluidos, o qual circula a amostra;
- Simular numericamente através do ANSYS CFX®;
- Analisar os dados obtidos tendo como variável resposta o teor de água através da simulação numérica;
- Comparar os resultados numéricos com dados experimentais reportados na literatura;
- Estimar os coeficientes de transporte de calor e massa dos materiais cerâmicos submetidos a secagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DA CERÂMICA

Segundo ANICER (2008), as peças cerâmicas são bem antigas tendo surgimentos na pré-história cerca de (2500 a.c.) onde foram encontrados vasos de barros, com cores naturais e cores mais escuras devido óxidos.

Com a necessidade de mudanças de hábitos, o homem das cavernas sentiu necessidade de criar abrigos e de se tornar um agricultor, tendo que pensar em formas de armazenar água e alimentos colhidos para que fosse utilizado em safras seguintes. Dessa forma, ao utilizar argila viu-se facilidade de moldar e construir vasilhas resistentes e impermeáveis, apontando que a cerâmica não foi apresentada por imigrantes e, sim que já era produzida por índios brasileiros (ANFACER, 2021).

A cerâmica pode ser utilizada como práticas artísticas onde são feitos com valores estéticos e como produção industrial na construção de materiais para ser utilizados em construções civis, a cerâmica também se destaca no setor de tecnologia high tech, na fabricação de foguetes espaciais por ter uma grande durabilidade e ótimo custo benefício (ANFACER, 2021).

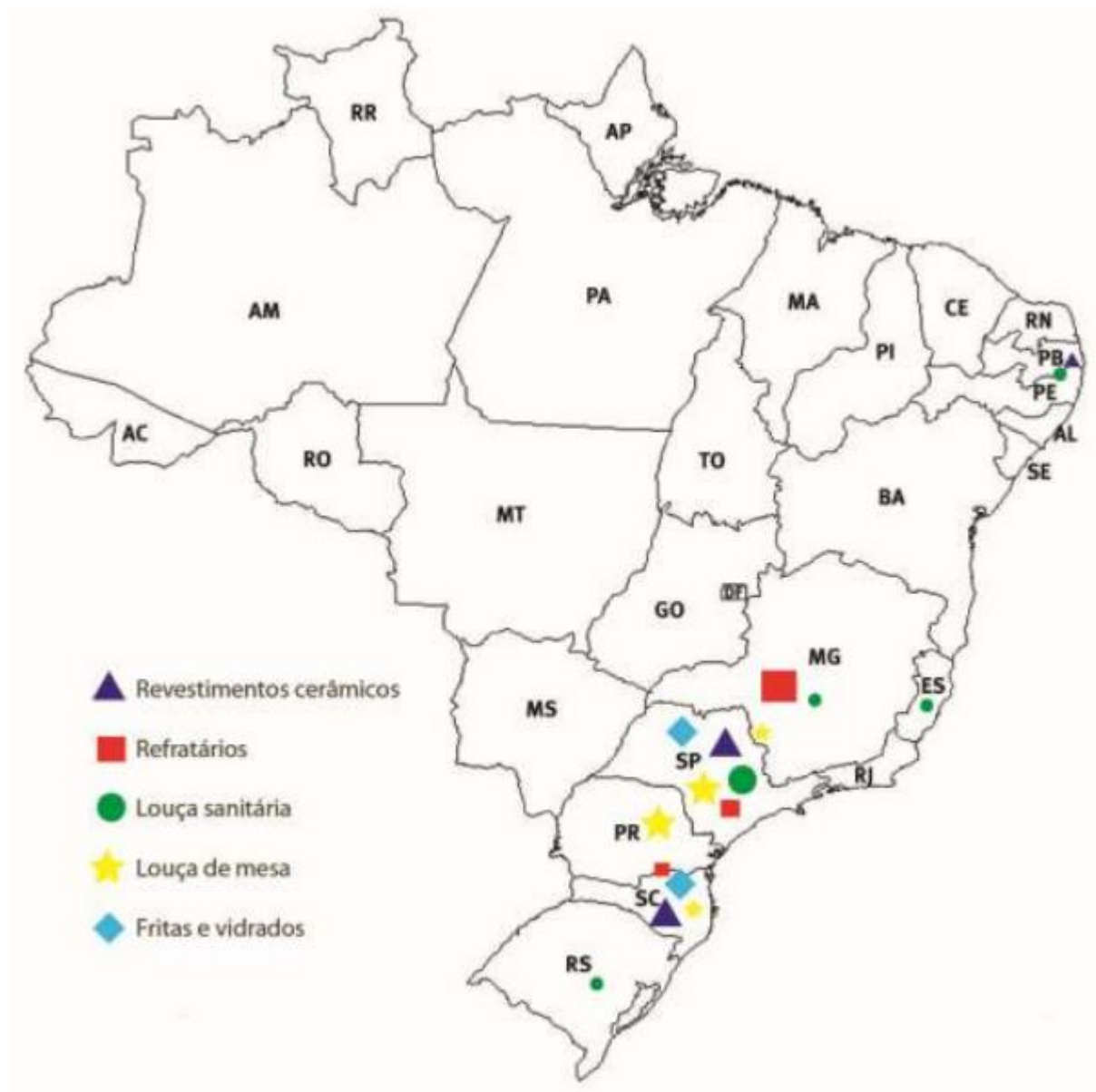
A produção de cerâmica no Brasil teve seu primeiro passo na ilha de marajó, onde os habitantes locais tiveram como as primeiras produções potes, baixelas dentre outros artefatos cerâmicos, com intuito de produzir vasilhas para carregar água e seus alimentos, como havia pouco conhecimento sobre argila era realizada uma queima de forma errada sendo assim um material de baixa qualidade e baixa resistência onde esse processo era realizados em fogueiras. Logo em seguida com a chegada da colonização surgiram as olarias que veio com grandes melhorias para a produção (SEBRAE, 2008).

Atualmente a indústria de cerâmica é dividida em subsetores onde suas características são individuais de acordo com seu avanço em diferentes tecnologias. A cerâmica vermelha tem a função de incorporar cores avermelhas que são os matérias utilizados nas construções civis (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandida) (BRITO, 2011).

O Brasil é um dos maiores produtores de cerâmica do mundo, tendo participação direta no PIB (Produto Interno Bruto) no qual corresponde cerca de 1,0%. Predominantemente localizados nas regiões sul e sudeste, os produtores são responsáveis por maior produção e consumo de cerâmica no Brasil tornando-se um fator importante para a análise da distribuição de empresas no setor cerâmico. Existem em média 5600 cerâmicas e olarias que são

responsáveis por produzir cerca de 8,3 bilhões de telhas tijolos e blocos mensalmente gerando cerca de 350mil empregos ligados diretamente a produção e cerca de 1,5 milhões de forma indireta. Na Figura 2.1 ilustra a produção de alguns segmentos do setor cerâmico (BUSTAMANTE; BRESSIANI, 2000).

Figura 2.1: Produção de cerâmica no Brasil



Fonte: Prado (2012)

Atualmente, a procura pelo produto brasileiro dobrou. Com isso, o setor ceramista brasileiro tende a executar grandes negócios no mercado asiático, devido a riqueza de matérias primas naturais, flexibilidade de fontes de energias alternativa e conhecimento de tecnologias e práticas adaptadas em equipamentos industriais, fazendo a indústria de cerâmica brasileira

evoluir de forma exponencial com diversos tipos de produtos e diversos segmentos, incluindo o mercado brasileiro a nível de qualidade mundial (GOMEZ, Ricardo, et al., 2020).

2.2 ARGILA

Argilas são utilizadas desde a antiguidade e era utilizada para fabricação de vários objetos cerâmicos, como tijolos, telhas e em diversas aplicações tecnológicas. Pode também ser utilizada com os adsorventes em alguns processos de clareação na indústria têxtil, sendo utilizada em remediação de solos e em aterros sanitários. São usadas para ajustar as propriedades reológicas de fluidos de perfuração de petróleo e de tintas, como carreadoras de moléculas orgânicas em cosméticos e fármacos e como suporte para catalisadores descartados, A possibilidade de modificação química das argilas permite o desenvolvimento do seu uso para diversos tipos de aplicações tecnológicas, agregando valor a esse abundante recurso natural. (TEIXEIRA-NETO; TEIXEIRA-NETO, 2009)

A argila é a principal matéria-prima para fabricação de produtos cerâmicos. Definida com material natural de textura terrosa e granulação fina que contem argilominerais e também não minerais como quartzo, mica, pirita, hematita e diversas outras impurezas (ABCERAM, 2015).

De acordo com Branco (2014), a argila é um sedimento composto por pequenas partículas medindo cerca de $1/256$ (4 micrômetros). Esses sedimentos podem ser formados por apenas um mineral argiloso, mas geralmente é formado pela mistura de outros minerais de argila com apenas um tendo predominância. Todos são formados por silicatos que são responsáveis por formarem lâminas que contém baixa dureza e uma boa clivagem para direção solicitada. Na **Figura 2.2** pode se ver uma amostra de argila.

Figura 2.2: Amostra de Argila



Fonte: Infopédia (2020)

2.2.1 Propriedades da argila

As argilas são definidas como materiais naturais, terrosos, de granulação fina que, quando umedecidos com água, apresentam plasticidade. De modo geral, o termo argila refere-se às partículas do solo que possuem diâmetro inferior a 2 μm e das quais podem fazer parte diferentes tipos de minerais: silicatos lamelares de magnésio e de alumínio (filossilicatos), quartzo, feldspato, carbonatos, óxidos metálicos e até mesmo matéria orgânica. O termo *argilominerais* é usado para designar especificamente os filossilicatos, que são hidrofílicos e conferem a propriedade de plasticidade às argilas (TEIXEIRA-NETO; TEIXEIRA-NETO, 2009).

As argilas possuem propriedades que são responsáveis por sua caracterização dentre as quais pode se destacar a elevada área superficial, plasticidade, capacidade de troca de cátions, capacidade absorção, hidratação e inchamento que são elencados a seguir:

- a) Elevada área superficial: por conter propriedade que possuem as ligações químicas que não são saturadas, permite que haja interação com diversas substâncias. Permitindo assim que a argila fique plástica a ser misturada com a água;
- b) Capacidade de troca de cátions: devido ao poder de troca de íons quando a argila entra em contato com água. Permite que a água entre com facilidades dentre as camadas de argilominerais, por conter uma ligação química fácil de ser acoplada água na superfície dos minerais. Essa troca pode ser realizada também sem a presença de água, tornando-se uma

das propriedades importante da plasticidade, dependendo do cátion que pode ser trocado com cálcio ou sódio, as propriedades plásticas podem se alterar.

- c) capacidade de absorção: Podendo capturar até mais de 100% de água em relação a seu peso;
- d) Hidratação e inchamento: uma das características principalmente das argilas montmorilonita, é a propriedade que permite a água fique retida entre as camadas e proporcionando a separação das folhas e assim o elevando o volume;
- e) Plasticidade: permite que a sua estrutura molecular em camadas ou folhas, a água ao ser adicionada fique entre as camadas atuando como um lubrificante e assim proporcionando o deslizamento das folhas umas sobre as outras;
- f) Tixotropia: É uma propriedade que proporciona um mineral argiloso em estado de pó de transformar em gel ao ser suspenso em muita água. Esse tipo de argila se transforma em liquido quando amassada e volta ao seu estado solido quando deixado em repouso.

2.3 TELHAS CERÂMICAS

De modo geral, as telhas cerâmicas são peças produzidas de forma separada, em formatos que possibilita o seu encaixam umas às outras, de forma bem precisa, dando formato o telhado ao final, em que este encaixe, proporciona estabilidade resistência e evitando infiltrações e diversos outros problemas nas construções civis, além disso proporcionando um charme e beleza com uma identidade única (ANICER, 2017).

2.3.1 Tipos de telhas

As telhas cerâmicas podem ser utilizadas em diversos tipos de coberturas, oferecendo as construções uma beleza atemporal alcançando a arquitetura urbana, contemporânea e rural, no mercado de telhas cerâmicas encontra-se diferentes tipos de telhas com diversos formatos cores e texturas, no entanto, os tipos de telhas mais usados em função de suas geometrias e encaixes como pode se observar a seguir:

A telha lusa pode proporcionar grande resistência a flexão, por ter seu encaixe mais robusto tem alto nível de estabilidade, quando comparado aos outros modelos tem menor peso e ótimo custo benefício com garantia de até 30 anos com resultado acima da média. A Figura 2.3 apresenta a telha lusa. Já na Tabela 2.1 é representado suas características.

Figura 2.3: Telha Lusa

Fonte: Aplicações de telhas cerâmicas (2010)

Tabela 2.1: Características geométricas telha Lusa

Características Telha Lusa	
Peso	3,0 a 4,0 kg
Comprimento	42 a 48 cm
Largura	23 a 30 cm
Altura	5 a 6 cm
Recobrimento longitudinal entre telhas	4 a 8 cm
Recobrimento transversal entre telhas	2 a 4cm
Espaçamento do ripado	36 a 42 cm
Unidades por m ²	10 a 14 cm

Fonte: Aplicações de telhas cerâmicas (2010)

A famosa telha romana tem formato retangular formato que proporciona melhor encaixe entre as peças e também aspecto mais moderno sem que prejudique a beleza do telhado. A Figura 2.4 apresenta a telha Romana. Já na Tabela 2.2 é representado suas características.

Figura 2.4: Telha Romana

Fonte: Aplicações de telhas cerâmicas (2010)

Tabela 2.2: Características geométricas telha Romana

Características Telha Romana	
Peso	1,8 a 4,0 kg
Comprimento	40 a 57 cm
Largura	12 a 20 cm
Altura	5 a 6 cm
Recobrimento longitudinal entre telhas	10 a 15 cm

Recobrimento tranvesal entre telhas	5 a 8 cm
Espaçamento do ripado	25 a 46 cm
Unidades por m ²	18 a 35 cm

Fonte: Aplicações de telhas cerâmicas

Além de ser uma das telhas mais leves por metro quadrado do mercado de cobertura tem duplo encaixe que possibilita maior estabilidade e também um maior nível de estanqueidade da cobertura quando comparado com maioria das telhas do tipo lusa. A Figura 2.5 apresenta a telha Marselha. Já na Tabela 2.3 é representado suas características.

Figura 2.5: Telha Marselha



Fonte: Aplicações de telhas cerâmicas (2010)

Tabela 2.3: Características geométricas telha Marselha

Características Telha Romana	
Peso	3,2 a 4,0 kg
Comprimento	42 a 47 cm
Largura	23 a 27 cm
Altura	3 a 5 cm
Recobrimento longitudinal entre telhas	5 a 7 cm
Recobrimento tranvesal entre telhas	2 a 4 cm
Espaçamento do ripado	32 a 40 cm
Unidades por m ²	10 a 12 cm

Fonte: Aplicações de telhas cerâmicas (2010)

Baseado nas telhas árabes as telhas canudos são bastante utilizados nos telhados brasileiros. Seus processos produtivos são de acordo com os parâmetros de qualidade é bastante procurada na reabilitação de grandes edifícios antigos e também para habitações unifamiliares e empreendimento turístico de lazer e qualidade. A Figura 2.6 apresenta a telha Canudo. Já na Tabela 2.4 é representado suas características.

Figura 2.6: Telha Canudo

Fonte: Aplicações de telhas cerâmicas (2010)

Tabela 2.4 - Características geométricas telha Canudo

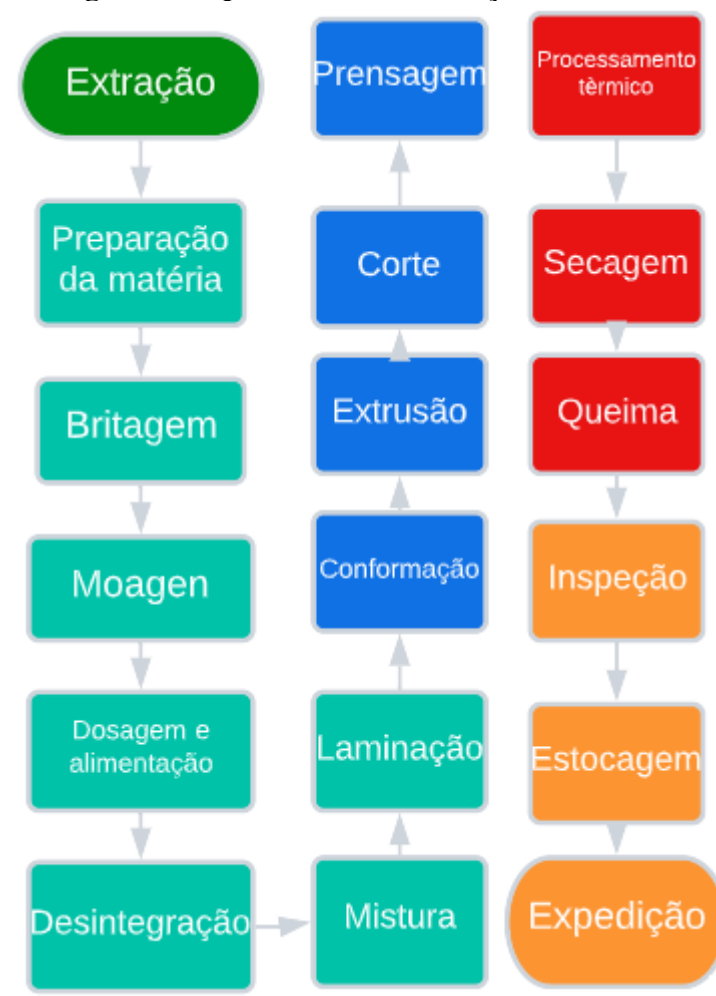
Caratcterísticas Telha Canudo	
Peso	3,2 a 4,0 kg
Comprimento	42 a 47 cm
Largura	23 a 27 cm
Altura	3 a 5 cm
Recobrimento longitudinal entre telhas	5 a 7 cm
Recobrimento transversal entre telhas	2 a 4 cm
Espaçamento do ripado	32 a 40 cm
Unidades por m ²	10 a 12 cm

Fonte: Aplicações de telhas cerâmicas

2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processo de fabricação de telhas pode ser dividido em 5 etapas (extração, preparação da matéria, conformação, secagem e processamento térmico ou cozimento). Esses processos ainda podem ser divididos em subprocessos. Na Figura 2.7 está representada as etapas através de um fluxograma.

Figura 2.7: Fluxograma do processo de fabricação de telhas cerâmicas



Fonte: Autor próprio

a) Extração:

A extração de argila ocorre utilizando retroescavadeira, pá carregadeira seguindo para as caçambas para serem transportadas até as olarias. A pouco tempo atrás a argila era extraída de forma manual com pá e picareta. Não se tinha conhecimento das maneiras corretas de extração já que não era feito um estudo com geólogos para analisar as jazidas, agredindo bastante o solo diversas vezes a área explorada não consegue se recuperar, gerando diversos impactos ambientais onde são extraídas. Na Figura 2.8 observamos como é feito esse processo de extração. Geralmente as jazidas estão localizadas próximas às indústrias de produção para facilitar a logística.

Figura 2.8: Extração de argila



Fonte: ceramicasalema (2012)

b) Preparação da matéria:

Processo responsável por misturar os materiais primas já conhecidas que são utilizadas para fabricação de matérias cerâmicos. A preparação da matéria é dividida em subprocessos:

- **Estocagem:** no processo de estocagem ou sazonalidade a matéria prima é colocada em descanso. Processo responsável pela descompactação e homogeneização da argila e decomposição de alguns compostos que aliviam as tensões e facilitam o manuseio. Esse Processo que garante a produção por todo período chuvoso. É recomendado o uso de duas ou mais argilas para mistura, que podem ser misturadas de forma manual ou utilizado pá carregadeira. Tendo melhor trabalhabilidade e distribuição homogênea de plasticidade.
- **Dosagem:** Responsável por alimentar o caixão alimentador e dosador através das correias, onde as matérias primas tem dosagens de forma proporcional. A dosagem depende das características cerâmicas da matéria prima utilizada.
- **Desintegração:** Quando argila tem um nível de dureza elevado é necessário que esse material passe por um desintegrador, para que seja triturado os aglomerados de maiores de argila, facilitando as operações seguintes.
- **Mistura:** Responsável por passar no misturador, equipamento responsável por realizar movimentos circulares, da água e argila de forma homogênea, até que fique com uma umidade entre 18% e 30% e uma plasticidade recomendada para extrusão. Na Figura 2.9 é mostrado um misturador do tipo Bonfanti mod mbh-2500.

Figura 2.9 : Misturador de argila



Fonte: Felini equipamentos (2019)

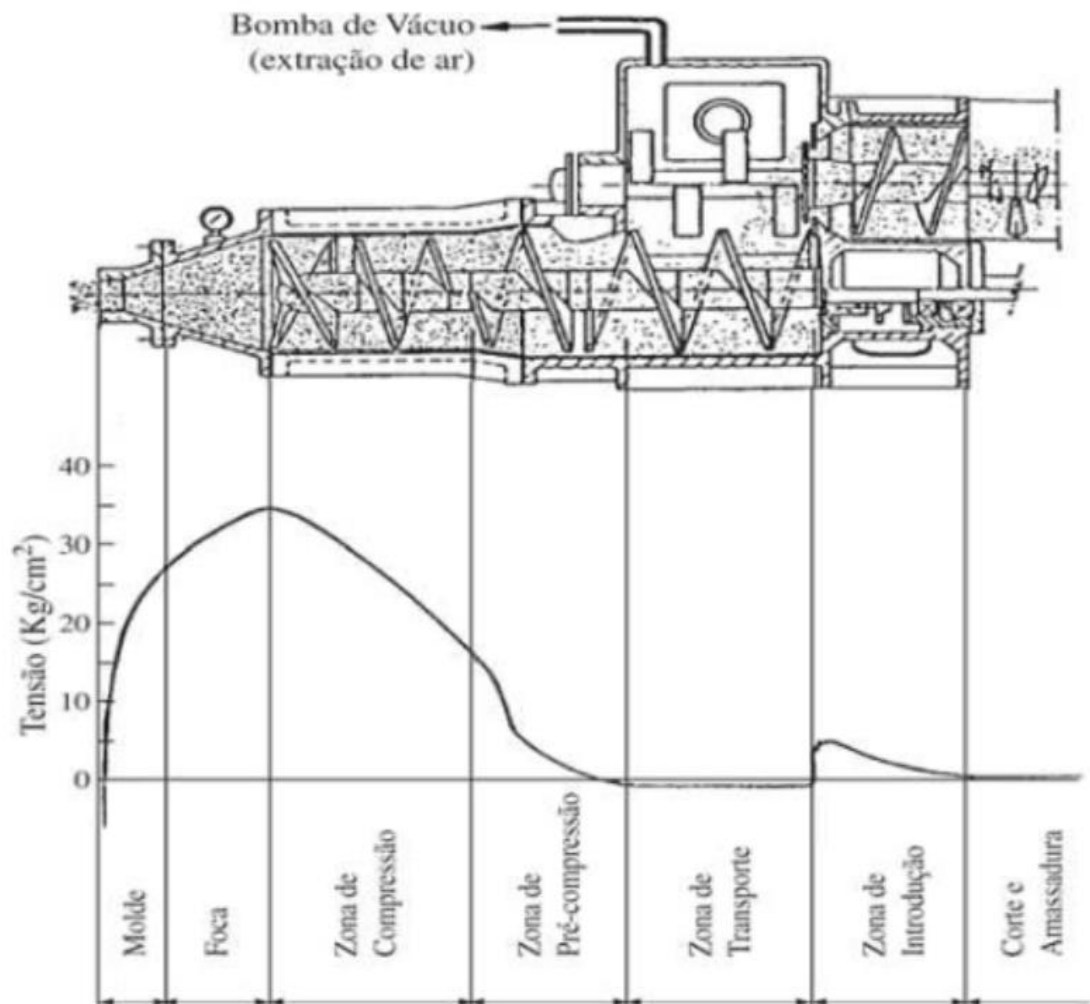
- **Laminação:** processo responsável de finalizar a mistura e realiza adensamento. Quando a argila passa pelo laminador ele realiza o processo de retirada de bolhas de ar ou algum outro glomerado que tenha permanecido.

c) **Conformação:**

Existem quatro métodos de conformação que são: tornearia, colagem, extrusão, prensagem a escolha do processo que vai ser utilizado depende do tipo de condição de trabalho das massas. Esse processo é responsável por moldar as peças, podendo chegar à diversas formas diferentes. Essa técnica é utilizada por proporcionar um alto nível de produtividade em matérias de seção transversal como telhas cerâmicas (prensagem plástica). Muito importante por retirar o ar da massa por completo para que seja alcançada uma boa homogeneização (RIBEIRO et al., 2003).

- **Conformação por extrusão:** um dos métodos mais utilizados por ser mais econômico, porem gera produtos de menor valor. Depois da década de 50 as tecnologias sofreram várias alterações. O equipamento que realiza extrusão é conhecido como extrusora, composto por um eixo helicoidal, que tem a função de comprimir arrasta as massas argilosas, passando pelas matrizes de formato recomendado. Devido ter uma alta plasticidade, a massa assume formato de uma matriz, na Figura 2.3 ilustra um corte de uma extrusora de dupla hélice.

Figura 2.30: Corte de uma extrusora de dupla hélice



Fonte: Ribeiro (2003)

- **Conformação por prensagem:** esse processo é responsável por compactar de um pó granulado (massa de argila). Essa operação consiste em 3 etapas (1) preenchimento da cavidade do molde, (2) compactação da massa e (3) extração da massa. Esse processo é um dos mais utilizados para indústrias cerâmica por ter um nível de produção avançada. E facilidade na automação e variedades na produção, conseguindo produzir peças de diversos tamanhos e formas.

Essa compactação pode ser realizada por uma baixa pressão, onde o aumento de pressão gera uma deformação plástica, conseguindo diminuir a porosidade dos materiais argilosos (ALBAJO, 2000).

- **Corte:** processo responsável por dimensionar comprimento das peças realizando a padronização de acordo com modelo que será implementado. Os processadores de corte podem ser divididos em dois tipos de cortadores, cortadores manuais e cortadores automatizados onde os cortadores automáticos são utilizados de três formas diferentes como: corte vertical rápido nesse

caso o fio cortante volta a sua posição inicial. Corte horizontal rápido nesse o fio volta a sua posição de origem pelo mesmo corte efetuado a mesma operação ao volta a sua posição inicial corte oblíquo é acoplado a velocidade da barra (LOYOLA, 1998).

d) Processamento térmico

O processo de secagem é de grande importância para diversos setores como: grãos, frutas, vegetais, madeira, produtos cerâmicos dentre outros onde o objetivo é a retirada de líquido de forma parcial ou por completo de forma cuidadosa para que não haja perda ao final do processo e se tenha um material de boa qualidade essa etapa é dividida em dois processos, secagem e queima das peças conformadas. Responsável por gera perda de umidade e transformação de sua estrutura e sua composição, chegando a suas características finais.

-Secagem: A água é retirada antes do processo de queima, nessa etapa é utilizado grande quantidade de energia térmica, ocorrendo o processo de evaporação de água, durante o processo de secagem pode ocorrer trincas defeitos, por acontecer tensões internas devido ao gradiente de temperatura.

- Secagem: A água é retirada antes do processo de queima, nessa etapa é utilizado grande quantidade de energia térmica, ocorrendo o processo de evaporação de água durante o processo de secagem e pode ocorrer trincas e defeitos, isso se dar pelo fato de tensões internas devido ao alto gradiente de temperatura.

A secagem pode ser realizada em galpões ou estufa podendo ser realizada em diferentes modos. A perda de umidade gira em torno 16% e 20% isso depende das matérias primas que são utilizadas (MÁS, 2002).

Por serem materiais muitos plásticos são necessários bastante água para realizar a conformação, causando retração elevada na secagem. A secagem deve ser realizada de maneira lenta e de forma controlada (SANTOS,2019).

Existem cinco maneiras de realizar a secagem: secagem natural ou ar livre, secagem em fornos, secagem artificial, secador de câmara e secador de túnel.

- Secagem natural ou ar livre: Processo responsável por utilizar o ar para realizar a secagem. Os secadores são colocados em barracões, com poucos obstáculos buscando maior proveito do vento.

- Secagem com secadores: a secagem natural gera uma grande dependência climática, fazendo com que seja buscado novas alternativas.

A bastante tempo já se usa secagem em prateleiras que são montadas ao redor dos fornos para que seja aproveitada o calor precedente que é utilizado para resfriamento dos fornos,

proporcionando um trabalho contínuo e intenso mesmo estando em períodos frios (SANTOS, 2021).

- Secagem artificial: consiste no processo de absorção de água na forma de vapor de ar aquecido. Para se ter uma secagem de forma contínua é preciso que o ar seja carregado de umidade os secadores artificiais tem uma maior ventilação do que secagem em galpões ou secagem ao ar livre, quantidade de vapor muito mais elevada, utilizando chaminés e ventiladores responsáveis por produzir correntes de ar (LOYOLA, 1998).

Devido ao ar quente ter menor densidade, se eleva na parte interior do secador até ter contato com produtos úmidos, transformando a água em vapor o que faz aumentar sua densidade conduzindo a água até o fundo do secador para que seja feita a retirada.

A quantidade de água que pode ser evaporada depende do aumento de temperatura. Onde o resfriamento se dá de forma inversa. É recomendado que o ar quente mantenha uma temperatura constante e realizando contendo com as peças enquanto elas secam, não permitindo que o nível de saturação seja ultrapassado e não permitindo deformações.

- Secador de câmara: é composto por câmaras responsáveis por controlar o nível de temperatura, fornecendo umidade e temperatura de forma uniforme por toda a câmara. É necessário que as câmaras sejam alimentadas com ar úmido ao final da secagem e não com ar seco (VIERA, 2022).

O ar quente realiza o trabalho de aquecimento dos produtos, fazendo seus poros dilatarem facilitando a retirada de umidade do interior da peça para o exterior.

- Secador túnel: consiste em um túnel com vagonetes capaz de deslizar por trilhos, ajustado de forma que não haja espaço livre dentre eles, que tem objetivo evitar perda de calor. O ar quente faz o trajeto em contra mão entrando pela saída da vagonete e aspirado nas chaminés o fluxo deve se manter constante e manter a velocidade de secagem de forma controlada para que não haja deformações (SOARES, 2007).

O processo de queima é responsável por finalizar o ciclo da fabricação dos materiais cerâmicos. Essa etapa é a mais importante para a produção, é etapa que ocorre todas as transformações químicas dos componentes da massa.

Um dos processos mais caros para a fabricação de telhas devido ao seu custo elevado para fonte térmica, tendo em vista que o processo de queima é um processo extremamente energético por consumir alto nível de combustível, óleo gás ou lenha. O combustível mais utilizado é a lenha por ser mais barato e acessível (VIERA, 2022).

Com passar dos anos o setor ceramista tem passado por diversas mudanças referentes a consumo energético ainda mais quando se relaciona ao consumo de petróleo. Tem se procurado

diversas alternativas energéticas, buscando equilíbrio dos custos produtivos relacionado a realidade do mercado consumidor, permitindo a sobrevivência das empresas.

2.5 ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Neckel Jr. 2008, apresentou um estudo experimental sobre secagem de telhas cerâmicas, em que telhas industriais argilosas foram secas em estufa através de métodos e condições controladas a velocidade, temperatura e umidade relativa do ar. Os estudos realizados deram por finalizados quando atingiu um material de boa qualidade sem trincas ou fissuras, sendo que se fez necessário contornar alguns problemas, como por exemplo, a deformação piroclástica, pois durante a queima de alguns modelos em fornos, fica passível à deformação piroclástica. Em altas temperaturas, fases de baixo ponto de fusão atingem estado visco plástico, e o material acaba se deformando, pelo próprio peso do corpo.

Khan e Straatman (2016), analisaram a secagem convectiva de materiais porosos como materiais que tem em sua composição água ou estrutura compactas e espaços vazios, podendo ter seu teor mediante a sua natureza higroscópica. Podendo tomar como exemplos de materiais higroscópicos são os tomates, madeiras, etc. onde no processo de secagem por convecção para os materiais citados onde contém um baixo nível de umidade tendo única passagem os poros úmidos. Podendo acontecer transporte em dois estados líquido e vapor:

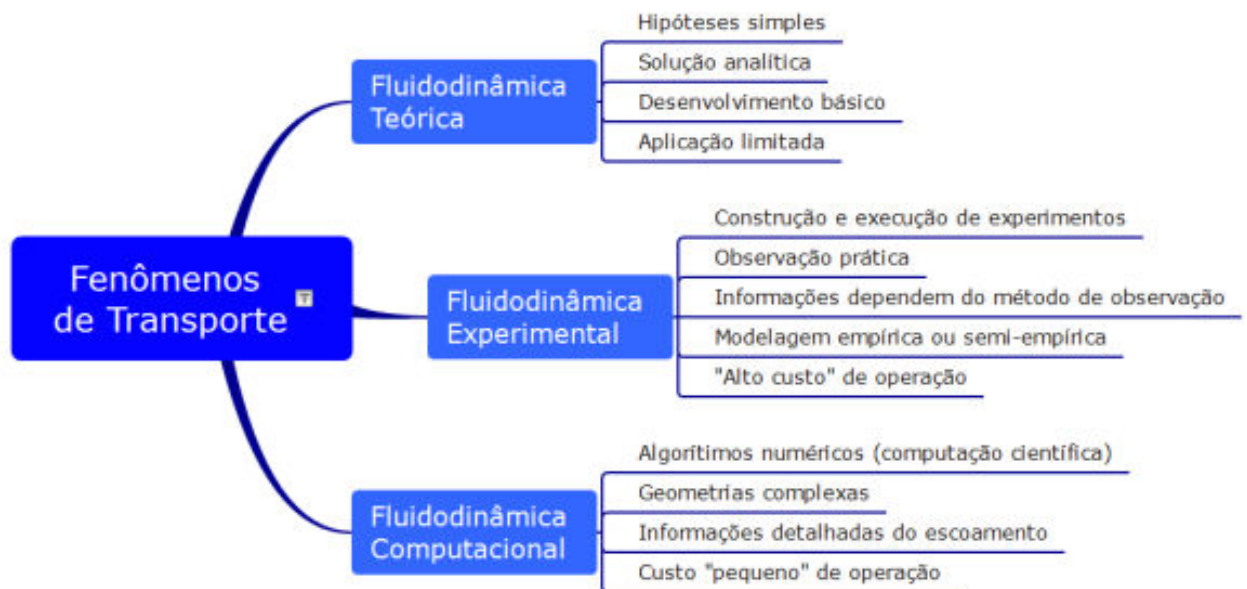
2.6 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

O ANSYS CFX[®] é um software comercial responsável por utilizar métodos de volumes finitos capaz de discretizar equações de conservação e simular volume de fluxo do fluido e transferência de calor em qualquer forma geométrica. Pode-se criar uma malha no ICEM CFD seguindo para o ANSYS CFX[®] para utilizar modelos físicos implantando propriedades dos materiais e resoluções das equações podendo gerar soluções com bases nos fenômenos e modelos físicos. O pacote computacional ANSYS CFX[®] é uma poderosa ferramenta no estudo no campo da fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Os principais usos desses códigos computacionais é por que ele permite a usabilidade de outros modelos que ainda não foram utilizados podendo implementar, através de outra linguagem a linguagem Fortran, tornando-se uma ferramenta poderosa para o uso de pesquisas científicas sendo possível utilizar modelos diferentes dando possibilidade de testar diferentes modelos matemáticos (SANTOS, 2019).

O uso do CFD pode gerar diversas possibilidades de resolver problemas físicos, economia de tempo e custo benefício elaborando o mínimo possível o uso de protótipos e experimentais

necessário, permitido observar detalhadamente o fenômeno. O uso do CFD caracteriza como uso de técnicas numéricas capaz de particionar o problema do domínio fluido estudado, faz uso do método dos volumes finitos, capaz de transformar equações diferenciais em equações algébricas. O particionamento é dado através da geração de malha, sendo elas uniformes ou não uniformes não estruturadas, ou híbridas, onde as malhas estruturadas são dadas por formatos hexaédricos, onde os elementos são compostos pelo mesmo número dos elementos vizinhos. Malhas não estruturadas contém malhas de diferentes formas onde os elementos próximos contêm números de elementos diferentes (SILVA, 2016). No fluxograma da Figura 2.41 é ilustrado o passo a passo dos processos fluidodinâmicos.

Figura 2.41: Passo a passo do processo fluidodinâmico



Fonte: Mitre (2010)

Devido a ferramenta ANSYS CFX[®] ter compatibilidade com diversas condições de contorno e condições iniciais o software ANSYS CFX[®] é atualizado para que possa ser encaixado em diversas situações diferentes, sendo capaz de alterar diversas variáveis mudando apenas o fluxo de condições em relação ao sentido para que possa se chegar a uma conclusão.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo apresentam-se as etapas realizadas nesta pesquisa, relacionadas ao estudo teórico da secagem de telhas cerâmicas.

Para realizar a modelagem numérica foi determinado o uso do pacote comercial ANSYS CFX[®] que é constituído por software de códigos fechados, que contem equações já particionadas utilizadas para resolução dos problemas. O pacote é composto por diferentes programas, para o estudo do presente trabalho foi utilizado o ANSYS ICEM-CFD[®] e o ANSYS CFX[®].

A pesquisa trata-se do estudo teórico da secagem de telhas cerâmicas conforme é ilustrado na Figura 3.1. O produto é bastante utilizado na construção civil, levando as considerações já mencionados no Capítulo 2.

Foi considerada a seguinte condição física:

a) Secagem de telha cerâmica onde o coeficiente de transferência de massa é determinado a partir das equações de momento linear, transferência de energia e de matéria na interface da telha-ar de secagem em estufa.

Figura 3.1 : Amostra da telha cerâmica utilizada nesta pesquisa



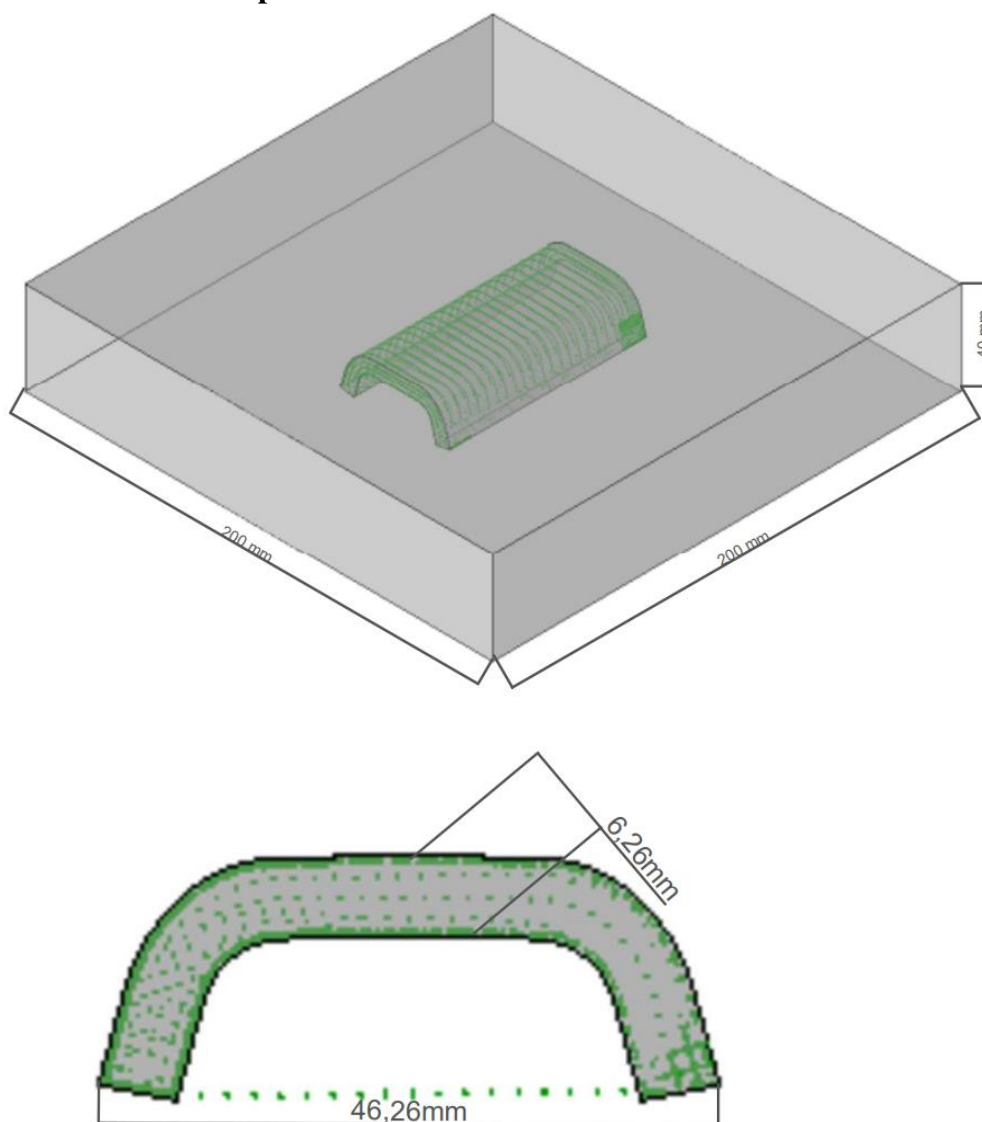
Fonte: Farias (2011)

3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA FÍSICO

3.1.1 O sistema Telha/Estufa

O domínio telha cerâmica estufa e suas respectivas dimensões é representada na Figura 3.2. É válido destacar que as dimensões utilizadas relacionadas a estufa, foram feitas com base na estufa de circulação mecânica de fabricação FANEM MODELO 320E, modelo utilizado por Farias (2011) em seus experimentos. A reprodução geométrica do sistema telha/estufa foi desenvolvida software ICEM CFD[®]. A criação desse sistema se deu com base em confeccionar a geometria da telha cerâmica e da estufa utilizada.

Figura 3.2: Geometria representativa telha cerâmica no interior da estufa



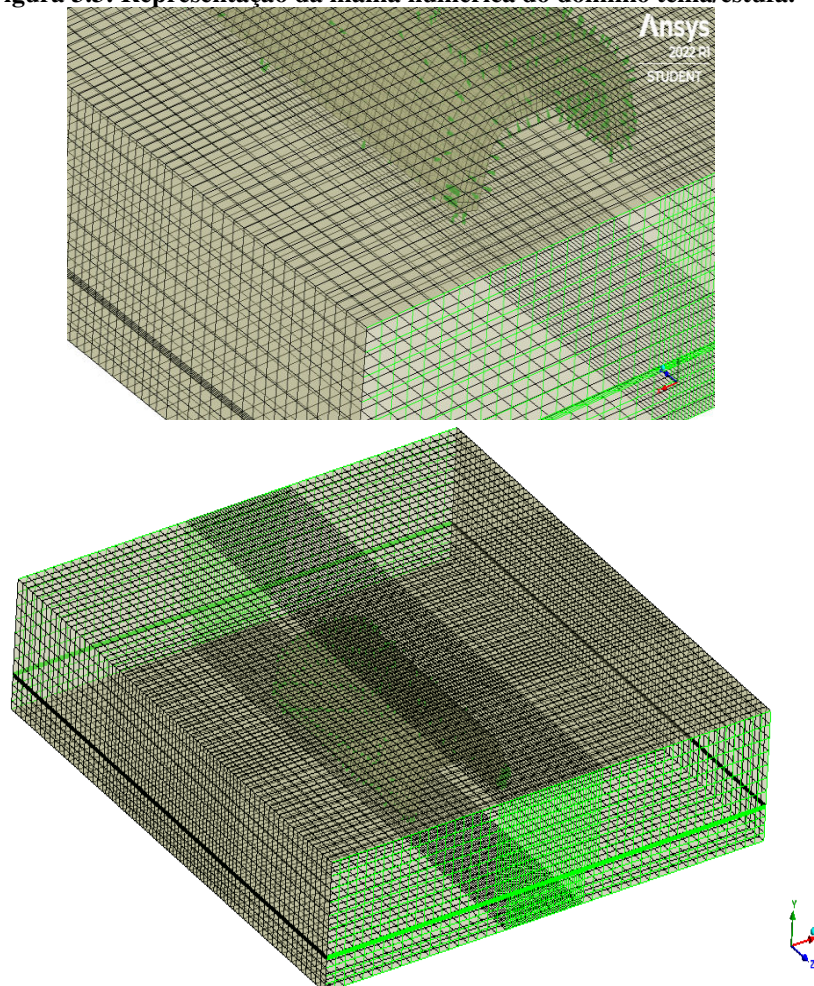
Fonte: Autor próprio

3.1.2 Malha numérica

Para geração da malha do objeto de estudo (telha/estufa) foram realizados os seguintes procedimentos. Inicialmente foi definido, uma estratégia de blocagem (Blocking > Create Block > Initialize > Blocks). Este método garante maior refinamento da malha e maior distribuição dos elementos nas proximidades das paredes solidas nas regiões de gradientes de velocidade, pressão e temperatura que são de suma importância. Dessa forma realizou-se blocagens para se obter uma malha de boa qualidade.

A malha utilizada nesta pesquisa é formada respectivamente por 6084 elementos 8000 nós, sendo esta obtida através do refinamento. Na Figura 3.3 é representado a malha numérica do sistema telha/estufa.

Figura 3.3: Representação da malha numérica do domínio telha/estufa.



Fonte: Autor próprio

3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E EQUAÇÕES GOVERNANTES

Nesta seção é apontada a modelagem matemática utilizada para os estudos da fluidodinâmica, e transferência de massa e calor durante o processo de telhas cerâmicas na presença da estufa.

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

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

3.2.1 Equações governantes

O fenômeno de secagem da telha cerâmica partiu com base em equações de conservação de massa, momento linear, energia e de matéria. onde essas equações são apresentadas a seguir

3.2.2 Secagem de telha cerâmica

- a) Conservação da massa

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

- b) Conservação de energia

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

Sendo:

P = massa específica

M = teor de umidade

H = entalpia do ar

D = coeficiente de difusão de massa

k = condutividade térmica

t = tempo

T = temperatura

c) condições iniciais de contorno

Foram adotadas as seguintes condições iniciais:

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

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

Para a face da telha foi adota as seguintes condições:

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

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

d) Teor de umidade

O teor de umidade médio, foi determinado de acordo com a equação a seguir:

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

Onde V é o volume da geometria (telha cerâmica).

3.2.3 Secagem de telha cerâmica em estufa

Para esta situação, foi utilizado as equações (3.1) a (3.7), para a fase sólida, utiliza-se as seguintes equações para a fase fluída

a) Conservação de massa

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

b) Conservação de momento linear

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

c) Conservação de energia

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

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

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

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

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

e) Modelo de turbulência

Para o modelo industrial é utilizado o modelo k- ϵ , determinado na equação a seguir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + Pk - \rho \epsilon + Pkb \quad 3.12$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \epsilon) = \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma \epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (c_{\epsilon_1} Pk - c_{\epsilon_2} \rho \epsilon + C_{\epsilon_1} P \epsilon b) \quad 3.13$$

f) Condições iniciais de contorno

- Fase sólida

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

✓ condição inicial

- Temperatura da telha: $T_{telha,0}$;
- Massa de água na telha: $m_{água,0}$

✓ Condição de contorno

- Fluxo conservativo na interface.

- Fase fluída

✓ Condição inicial

As condições iniciais para a simulação numérica são adotadas para a massa de água inicial na estufa e na telha, de acordo com os seguintes dados:

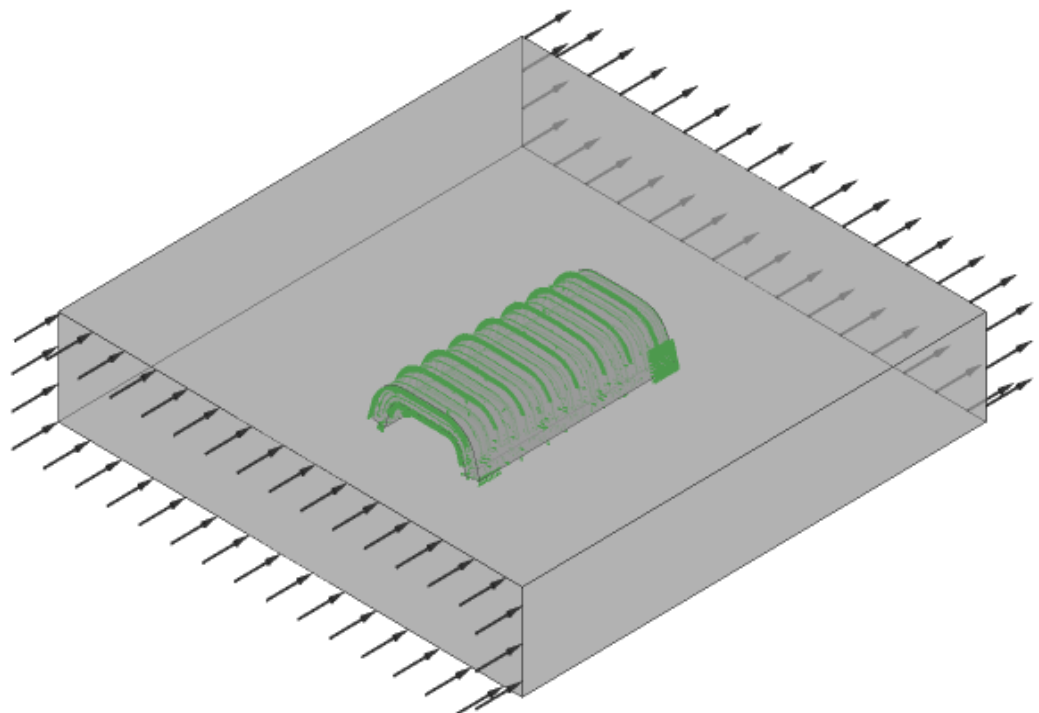
- Massa de água inicial no interior da estufa: $m_{vapor,0}$;
- Massa inicial de água no interior da telha: $m_{água,0}$;
- Temperatura do ar no interior da estufa: $T_{estufa,0}$;
- Temperatura inicial da telha: T_0 .

✓ Condição de contorno

- Velocidade do ar na entrada da estufa: 1 m/s;
- Vazão mássica de ar na entrada da estufa: $\dot{m}_{ar\ seco}$;
- Vazão mássica de vapor na entrada da estufa: $\dot{m}_{vapor}$;
- Na parede da estufa foi considerada adiabática e impermeável;
- Na saída consideram-se uma condição de pressão prescrita e igual a 101325 Pa.

Para a Interface do sólido com o fluido. Pode se observar tais condições. Na Figura 3.4

Figura 3.4: Direção de escoamento do fluido



Fonte: Autoria própria

Na modelagem matemática foi utilizado as condições na interface do fluxo conservativo nas fases que foram envolvidas. As condições de contorno representam que o fluxo da variável em um domínio passa entre a interface e o outro domínio sem que haja perdas, transformando a variável e uma condição de contorno de terceira espécie.

Neste contexto, o fluxo difusivo de uma substância na superfície sólida é igual ao fluxo convectivo da mesma substância no ar, então pode-se descrever desta forma:

$$-D_a \nabla m = h_m(m - m_{eq}) \quad 3.16$$

Onde o Da é representado pela difusividade de água no ar; m é a massa de água na interface; m_{eq} é a massa de água na condição de equilíbrio e hm é o coeficiente convectivo de transferência de massa. Para Equação (3.16), a única propriedade inicialmente estabelecida refere-se à difusividade de massa de água no ar.

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

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

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

Este trabalho é aplicado à secagem de telhas cerâmicas, para a realização das simulações numéricas foram utilizados dados reportados por Farias (2011).

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

Tabela 3.1: Dados experimentais relativos à cinética secagem para T=342,85 K.

Casos		Ar de Secagem		Telha Cerâmica			
	T (K)	V (m/s)	UR (%)	M_0 (kg/kg,b.s)	M_e (kg/kg,b.s)	T_o (K)	T_e (K)
1	342,85 K	1,0	75	0,2418	0,0066	299,15	342,85

Fonte: Farias 2011

3.2.4 Parâmetro mássico do produto

Os cálculos realizados foram baseados nos dados experimentais reportados por Farias (2011). Estes dados foram utilizados para realizar as simulações numérica, o procedimento para obtenção está descrito a seguir:

a) Massa de água

A água obtida na telha (m_a) em cada tempo de medição, foi realizada com base na massa inicial da telha (m_0) e a massa da telha seca (m_s). A equação é representada a seguir:

$$m_a = m_0 - m_s. \quad 3.18$$

b) Teor de umidade médio em base seca

Para se obter o teor de umidade médio em base seca da telha ($\bar{M}$) foi tomado como base a massa da telha no tempo $[m(t)]$ e da massa seca da telha (m_s) como é demonstrado a seguir:

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

c) Teor de úmida média adimensional

Para se obter o teor de umidade adimensional na telha ($\bar{M}$) que foi realizado com base no valor de teor umidade em base seca ($\bar{M}$), do teor de umidade de equilíbrio ($\bar{M}_e$) e do teor de umidade inicial ($\bar{M}_0$)

$$\bar{M} = \frac{(\bar{M}) - (\bar{M}_e)}{(\bar{M}_0) - (\bar{M}_e)}. \quad 3.20$$

3.2.5 Parâmetros de ar de secagem

Os cálculos psicrométricos foram desenvolvidos com base em dados tabelados de (Çengel et al., 2007) e nos dados experimentais reportados em Farias (2011), os quais foram utilizados para determinar as condições de contorno utilizadas nas simulações numéricas. São elas:

a) Pressão vapor

Para se obter o cálculo da pressão vapor foi realizado o cálculo com base na umidade relativa do ar (ϕ) e na pressão de saturação do vapor (P_{sat}^{vapor}) da seguinte forma:

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

b) Umidade absoluta

Para se obter a umidade absoluta (ω) o cálculo realizado se deu com base na pressão atmosférica (P) e na pressão de vapor (P_{sat}^{vapor}) da forma a seguir :

$$\omega = 0.622x \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} \quad 3.23$$

c) Densidade do ar seco

O cálculo de densidade do ar seco ($\rho_{ar seco}$) foi obtido usando a lei dos gases, expresso como função da temperatura absoluta e da pressão absoluta P como pode se observa a seguir:

$$\rho_{ar seco} = \frac{P}{8,31 \text{ J/mol } KT} \quad 3.24$$

d) Vazão volumétrica

Para obtenção da vazão volumétrica ($W_{ar seco}$) foi utilizado a velocidade do ar seco ($v_{ar seco}$) e da área da estufa A_{estufa} como pode se observar a seguir:

$$W_{ar seco} = v_{ar seco} x A_{estufa} \quad 3.25$$

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

$$A_{estufa} = base x altura \quad 3.26$$

e) Vazão mássica do ar seco

A vazão mássica do ar seco ($m_{ar seco}$) foi obtido através da densidade do ar seco seco ($\rho_{ar seco}$) e da vazão volumétrica ($W_{ar seco}$) da seguinte forma:

$$m_{ar seco} = \rho_{ar seco} x W_{ar seco} \quad 3.27$$

f) Vazão mássica do vapor de água

A vazão mássica do vapor de água (m_{vapor}) foi obtido através da umidade absoluta (ω) e da vazão mássica de ar seco ($m_{ar seco}$) da seguinte forma:

$$m_{vapor} = \omega \times m_{ar seco} \quad 3.28$$

3.3 PROCEDIMENTO NUMÉRICO

Foram realizadas simulações numéricas em regime transiente, em um intervalo de tempo de 10 minutos, em um resíduo quadrado médio de 10^{-6} . O tempo para a conclusão do processo de secagem foi estimado de acordo com o experimento realizado. Os dados utilizados são descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Dados usados nas simulações.

Domínio sólido				Domínio fluido				
$T_{telha,0}$ [K]	$m_{água,0}$ [g]	$m_{água,eq}$ [g]	m_s [g]	$T_{estufa,0}$ [K]	$m_{vapor,0}$ [g]	$\dot{m}_{ar seco}$ [g/s]	$\dot{m}_{vapor}$ [g/s]	Tempo de secagem [min]
299,15	11,485	0,314	47,499	342,85	0,30174	14,6203	2,72964	2072

Para o domínio interno sólido, o qual se refere a telha cerâmica, foi construído um novo material a argila. Suas propriedades físicas e químicas do ar e do produto são descritas

Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Propriedades físicas e químicas do ar e da argila usadas nas simulações.

Propriedades	Ar	Argila
Condutividade térmica k [$W m^{-1} K^{-1}$]	0,0261	1675
Calor específico c_p [$J kg^{-1} K^{-1}$]	1004,4	1673
Densidade ρ [kg/m^3]	1,185	1985,8
Viscosidade dinâmica [$kg m^{-1} s^{-1}$]	$1,831 \times 10^{-5}$	

Fonte: Manual Ansys (2015)

3.3.1 Estimativa dos coeficientes de transportes

A convecção é um fenômeno de transferência de calor cuja a transferência de calor ocorre devido a uma movimentação macroscópica de massa, incluindo em dois sistemas envolvidos em duas temperaturas distintas. Um sólido e um fluido, que assume a

responsabilidade de transporta calor (deslocamento de massa). Juntando condução com movimentação de massa em meios fluidos. Um fluido ao entrar em contato com uma superfície aquecida, adquire o calor por convecção, proporcionando uma ascensão na densidade do fluido permitindo lugar ao mais frio. A taxa de transferência do calor por convecção é proporcional a diferença de temperatura e descrita pela lei de newton do resfriamento como pode ser observado. (SANTOS,2019)

$$Q_{conv} = hcAs(T_s - T_{ar}) \quad 3.29$$

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

O coeficiente de transferência de calor hc , cuja suas propriedades são determinadas de acordo com o fluido (densidade, calor específico, viscosidade, condutividade térmica).

O valor do coeficiente de transferência foi determinado com base nos dados experimentais submetido no trabalho de Farias (2011).

O valor inicial do coeficiente de transferência de calor convectivo para a temperatura escolhida experimental é de $6,58 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

A estimativa do coeficiente de difusão de massa foi obtida pela minimização do erro mínimo entre os dados preditos experimentais Equação 3.30 e 3.31, deste feito, usando o teor de umidade médio da telha, ao longo do processo de secagem.

$$ERMQ = \sum_{i=1}^n (\Phi_{i,Num}^* - \Phi_{i,Exp}^*)^2. \quad (3.30)$$

$$\bar{S}^2 = \frac{ERMQ}{(n - \hat{n})}. \quad (3.31)$$

Para isso, usou-se como parâmetro inicial o valor de D reportado por Farias (2011). que correspondente 8.10^{-7} .

Para assegurar que o valor do coeficiente de difusão de massa apresentou um bom ajuste, realizou um estudo estatístico baseado na distribuição t Student.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

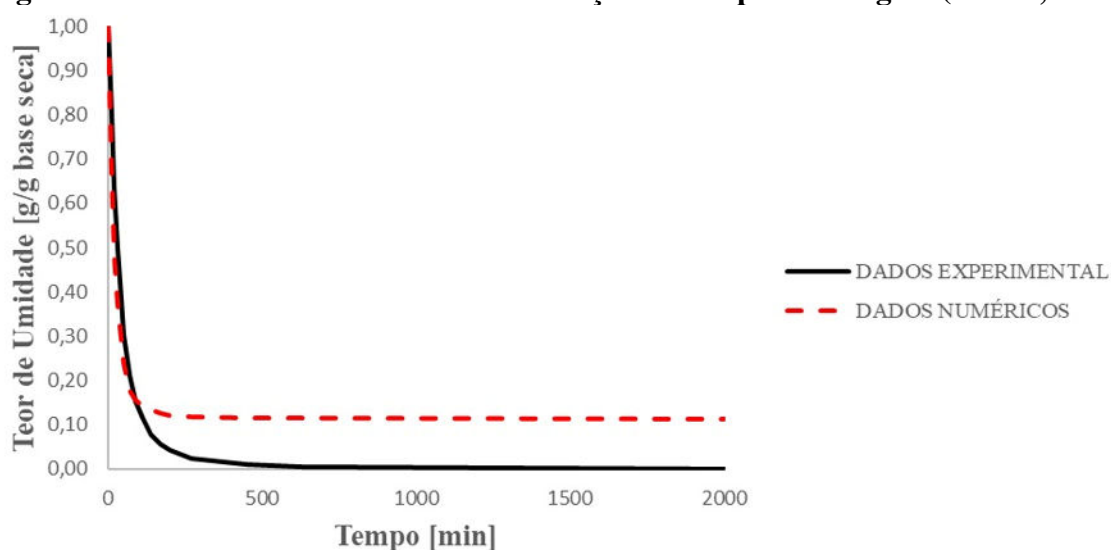
Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados das simulações da transferência de calor e de massa na telha durante o processo de secagem.

4.1 CINÉTICA DE SECAGEM E AQUECIMENTO

A Figura 4.1 ilustra a evolução do teor de umidade ao longo do tempo de secagem, quando a telha está sendo seco à temperatura de $69,7^{\circ}\text{C}$. Esta figura indica que os resultados numéricos da secagem da telha se ajustam adequadamente aos dados experimentais reportados por Farias (2011). Uma inspeção mais refinada da Figura 4.1 possibilita ver uma boa concordância entre os dados experimentais e numéricos nos instantes iniciais até cerca de 300 min. A partir deste instante, até os instantes finais, percebe-se certa discrepância entre os resultados simulados e os dados experimentais, indicando que a difusividade mássica efetiva deveria ser variável e não constante como considerada nesta pesquisa, e por não ter levado em consideração o encolhimento do material, propriedade esta que pode ter um significativo efeito na difusividade de massa e, conseqüentemente na taxa de remoção da umidade.

A partir de um estudo comparativo entre o valor previsto do teor médio de umidade e dos dados experimentais, obteve um erro mínimo quadrático de $0,068372 \text{ (kg/kg)}^2$, utilizando um coeficiente de difusão em massa de $20 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, coeficiente este obtido a partir de ajuste de curvas, em que sua indicação foi tomada através do menor valor da variância e desvio padrão.

Figura 4.1: teor de umidade da telha em função do tempo de secagem ($T=342,85 \text{ K}$)

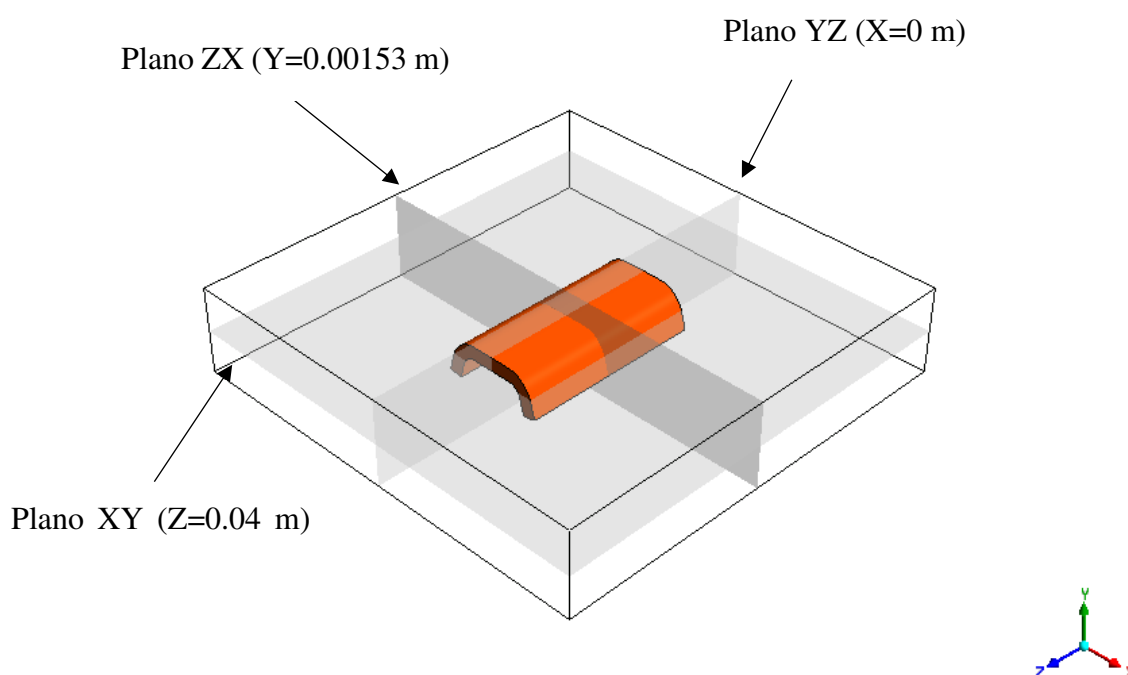


Fonte: Autoria própria

4.2 DISTRIBUIÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSPORTE DA TELHA

Para análises de distribuição dos parâmetros foram adicionados sobre o domínio sólido os seguintes planos: YZ ($X = 0\text{m}$), XZ ($Y = 0.00153\text{m}$) e XY ($Z = 0.04\text{m}$). Essa análise é observada na Figura 4.2:

Figura 4.2: Planos de análise sobre os domínios fluido e sólido



Fonte: Autor Próprio

4.3 CAMPO DE TEMPERATURA NA TELHA

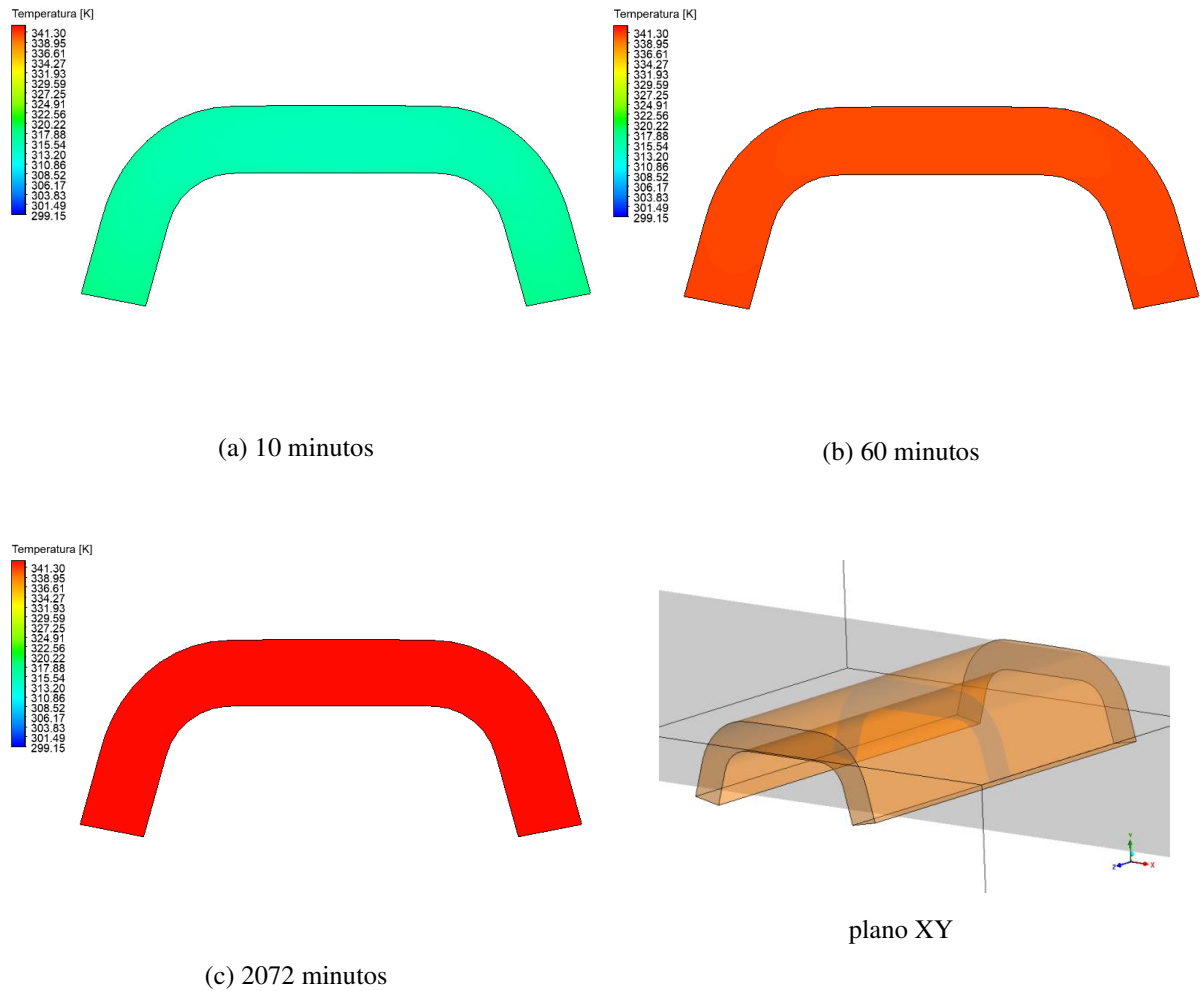
A seguir é representado os resultados das análises direcionadas aos fenômenos da secagem relacionada a telha cerâmica separadamente na temperatura de $342,85\text{ K}$.

Em seguida é possível verificar a distribuição de temperatura no interior do sólido ocorrida no decorrer do processo com relação aos três planos: eixo XY ($Z = 0.04\text{ m}$), plano ZX ($Y = 0.00153\text{ m}$) e plano YZ ($X = 0.0\text{ m}$).

Observando as figuras constata-se que nos instantes iniciais ($t = 10\text{ minutos}$) a temperatura tem uma baixa variação, ou seja, ela permanece próxima do seu valor inicial. Após 60 minutos nota-se que a temperatura tem um aumento considerável, porém, ainda não é seu valor máximo

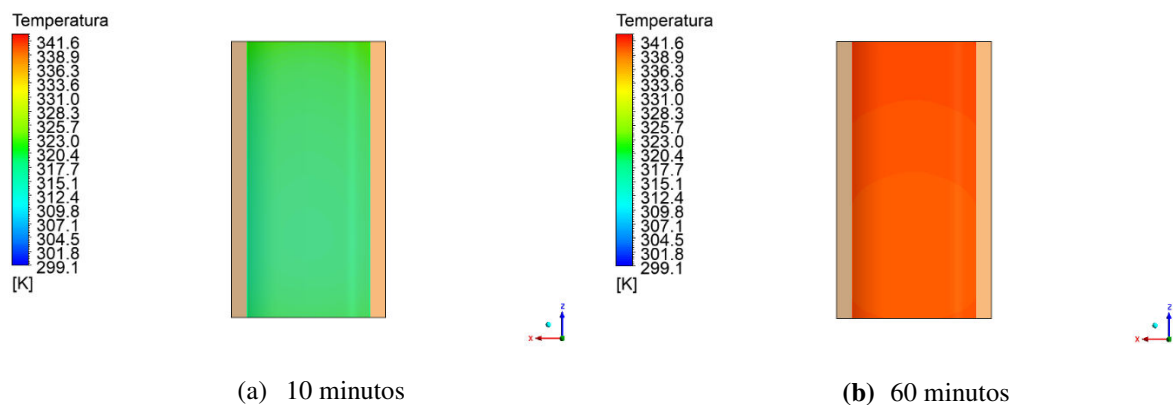
que, por sua vez, será alcançado somente quando ultrapassar os 2072 minutos que é $T=342,85$ K. Nas Figuras 4.2; 4.3 e 4.4 é representado o campo de temperatura no interior da telha.

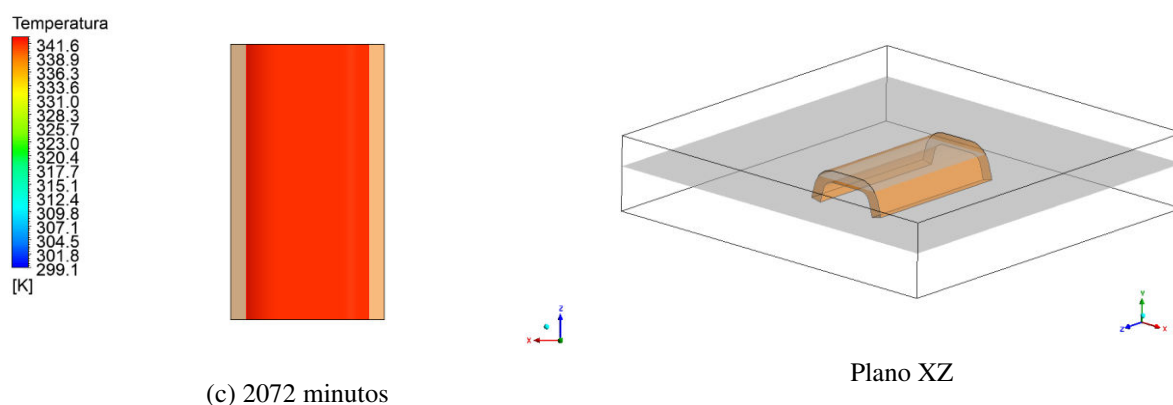
Figura 4.3: Campo de temperatura no interior da telha (Plano XY) para a secagem a 342,85 K



Fonte: Autor próprio

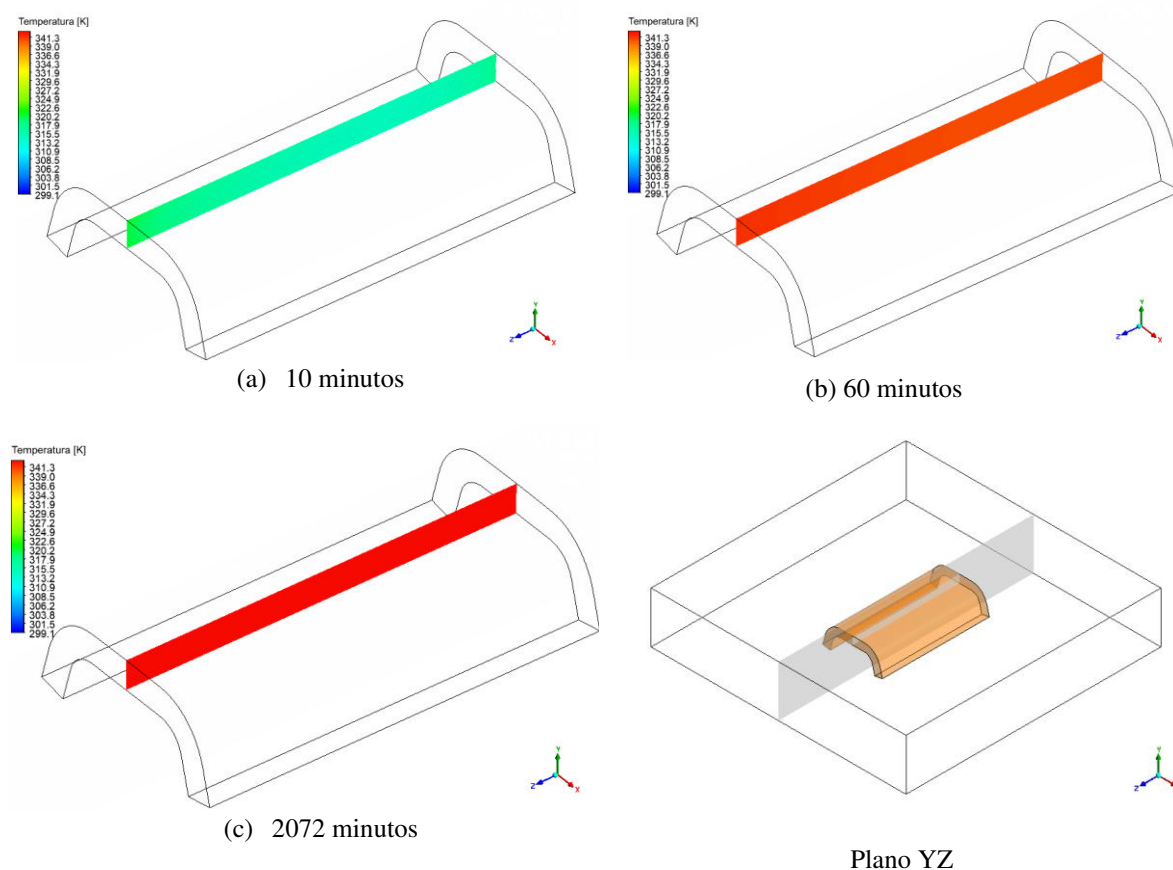
Figura 4.4: Campo de temperatura no interior da telha (Plano ZX) para a secagem a 342,85 K





Fonte: Autor próprio

Figura 4.5: Campo de temperatura no interior da telha (Plano YZ) para a secagem a 342,85 K



Fonte: Autor próprio

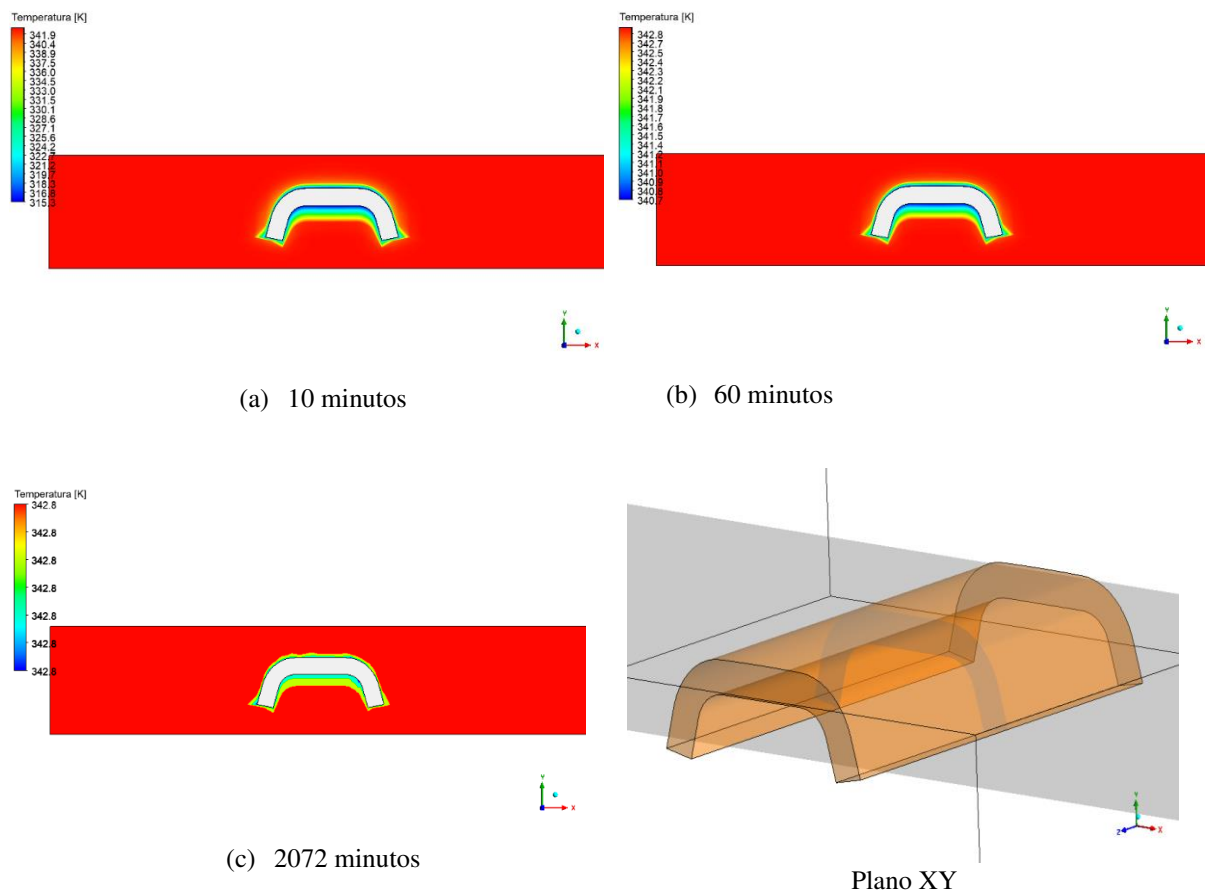
4.4 Distribuição dos Parâmetros de Transporte no ar

4.4.1 Campo de temperatura do ar

A distribuição de ar no interior da estufa é representada a seguir em diferentes tempos e condições de secagem. Com base nas análises realizadas é possível verificar a transferência de

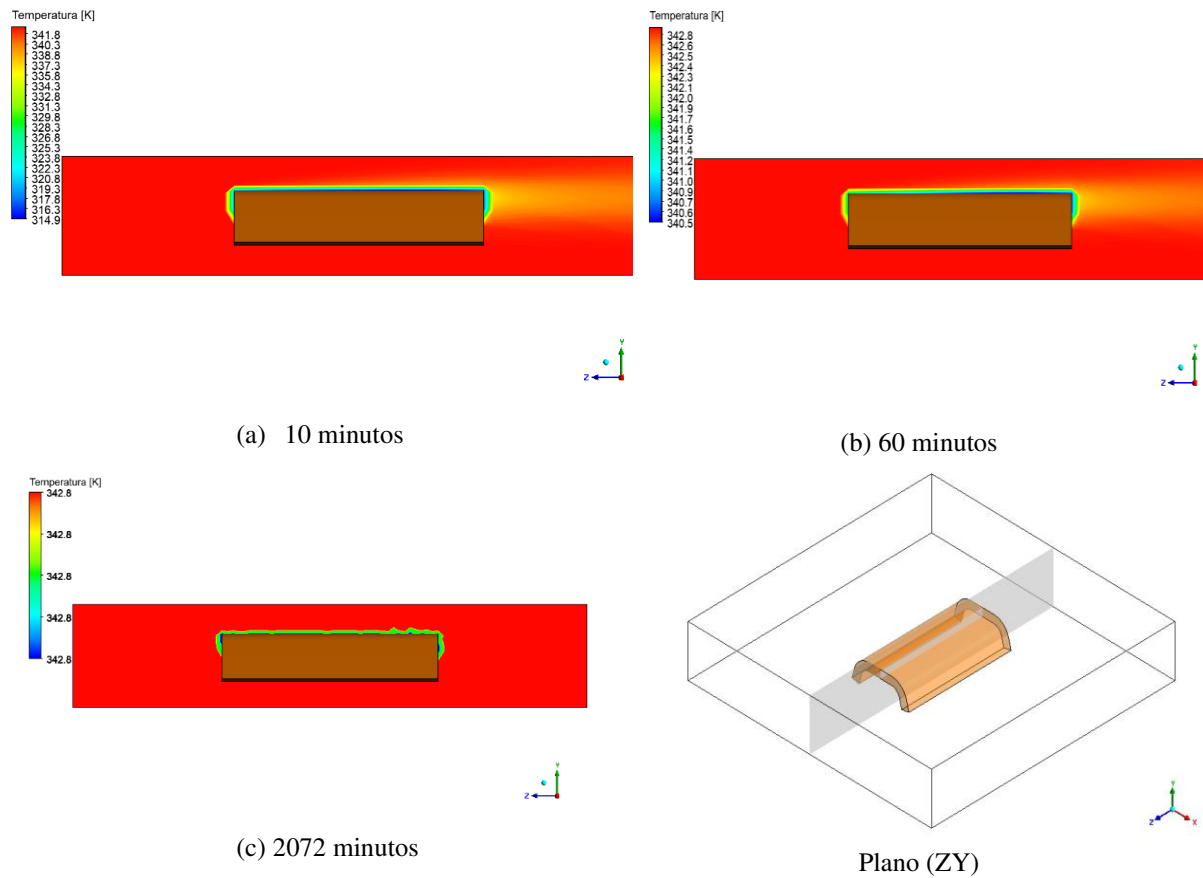
calor que ocorre de forma espontânea entre o ar com temperatura elevada e a telha com temperatura menos elevada. No interior da estufa, ao passar pela telha, o ar tem uma leve diminuição de temperatura. É possível observar que essa diminuição ocorre junto a superfície da telha e dentro dos limites dela. A temperatura do ar tem uma maior variação nos minutos iniciais da secagem, onde a telha tem um maior gradiente de temperatura entre telha estufa. Nas Figuras 4.5 e 4.6 é possível observar a distribuição de temperatura do ar no interior da estufa.

Figura 4.6: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano XY) para secagem a 342,85 K.



Fonte: Autor Próprio

Figura 4.7: Campo de temperatura do ar no interior da estufa (Plano YZ) para secagem a 342,85 K.

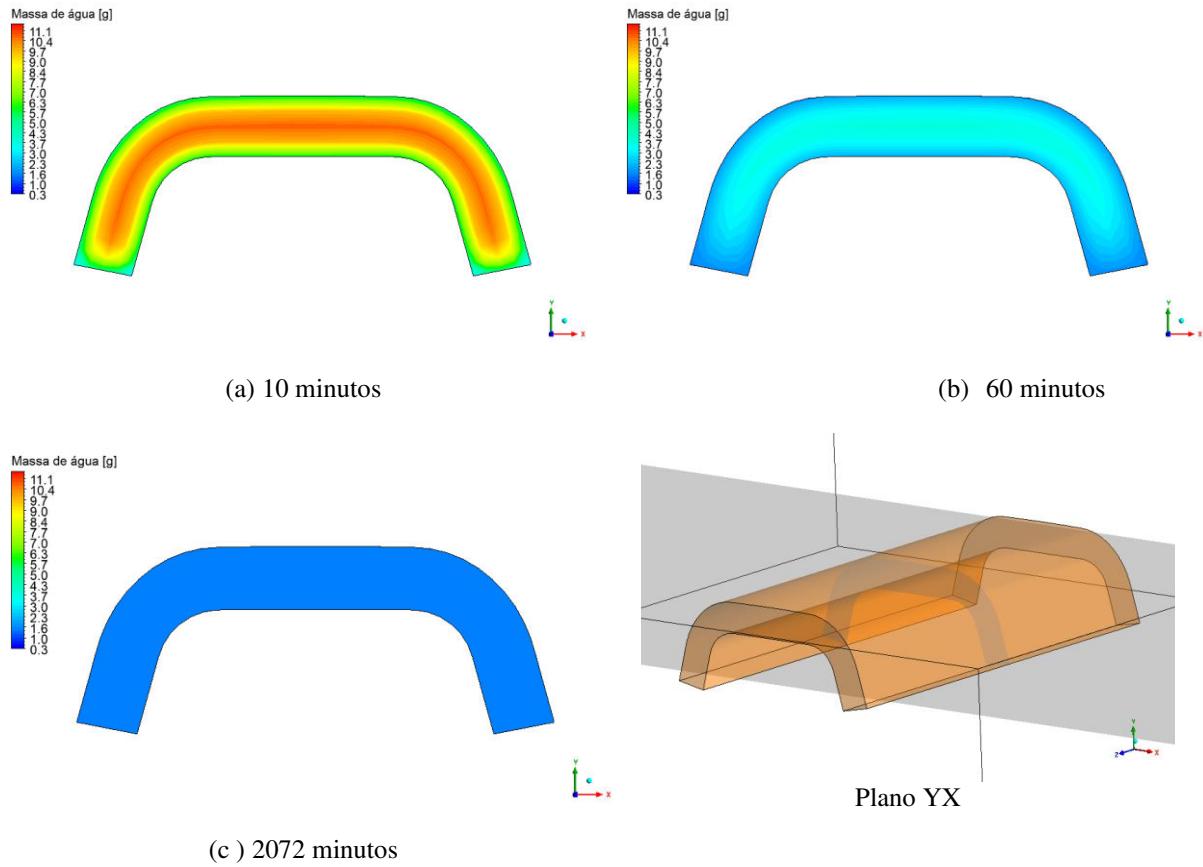


Fonte: Autor próprio

4.4.2 Campo de massa de água

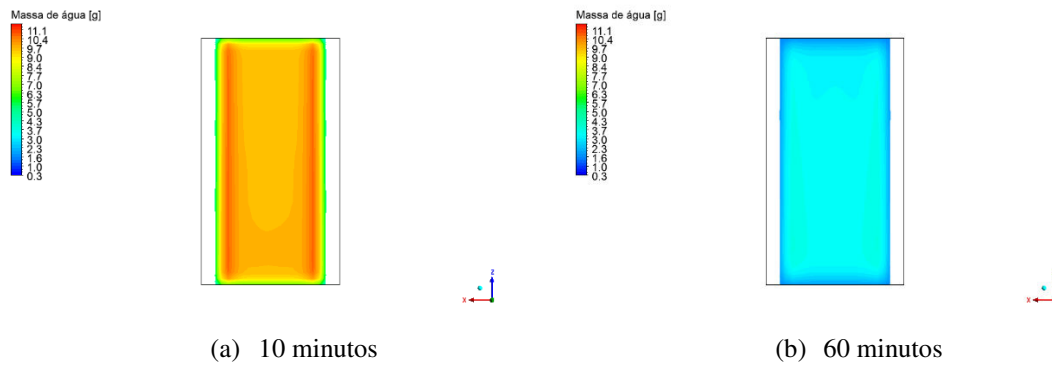
Realizando análises em torno de todos os planos criados, eixo XY ($Z=0.04$ m), plano ZX ($Y=0.00153$ m) e plano YZ ($X=0.0$ m), o campo de massa de água é homogêneo nos primeiros instantes ($t=0$), incluindo apenas a massa corresponde à umidade absoluta do ar de secagem. Com o decorrer do tempo observa-se que ao passar ar pela telha cerâmica, a massa de água é transportada e, desse modo, é eliminada do material. Nas Figuras 4.7 a 4.9 é representado o campo de massa de água estufa, tempos e condições de secagem.

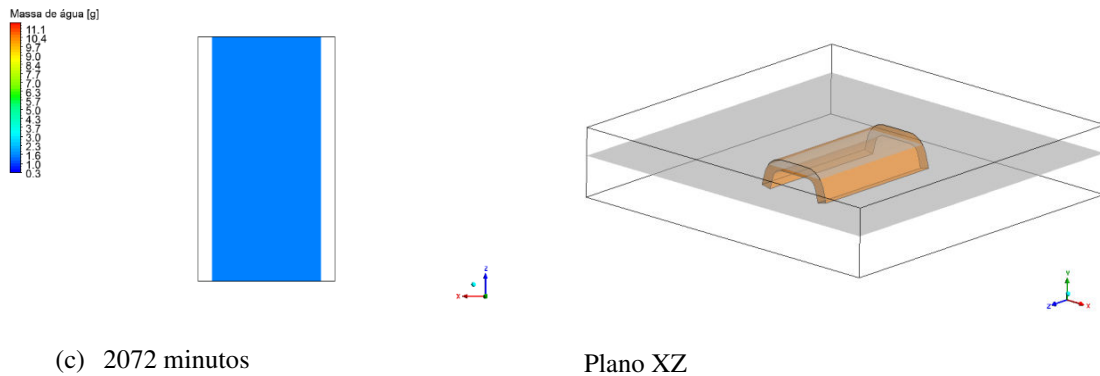
Figura 4.8: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano YX) para secagem a 342,85 K.



Fonte: Autor próprio

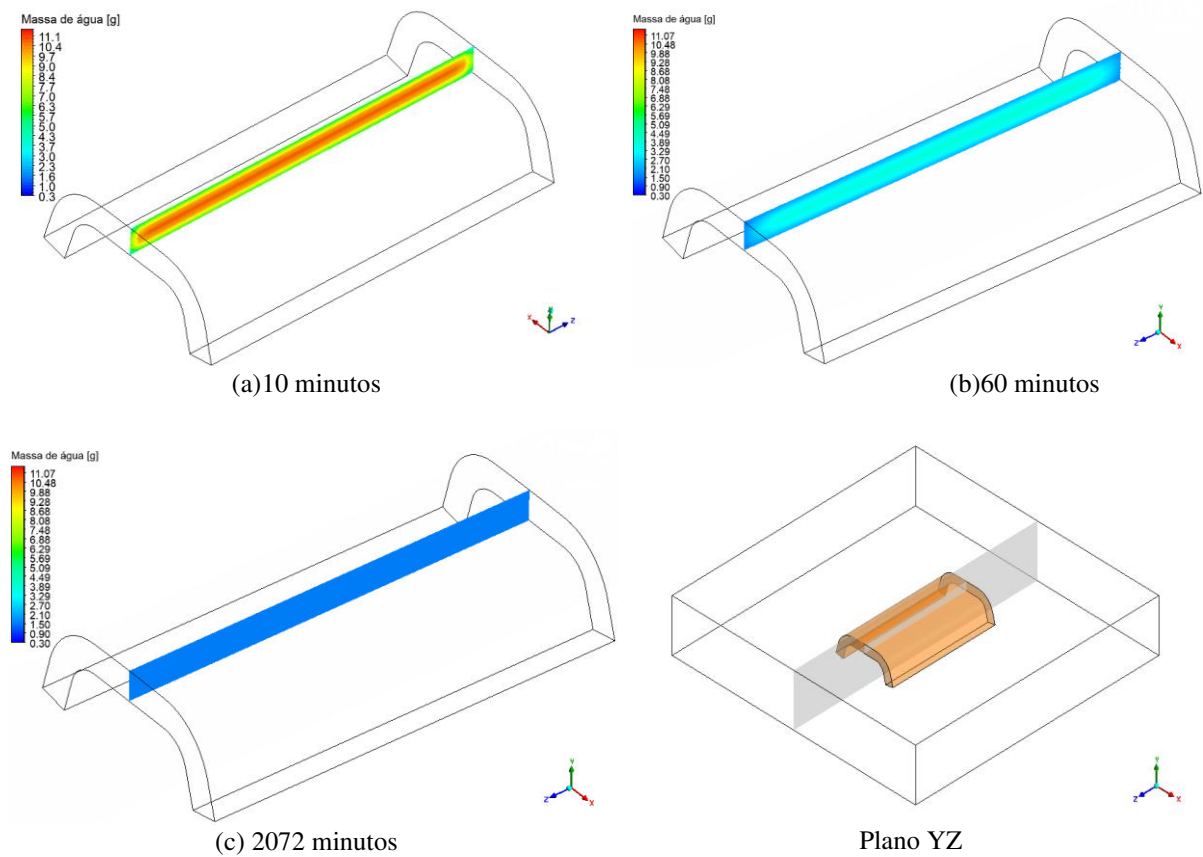
Figura 4.9: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano XZ) para secagem a 342,85 K.





Fonte: Autor Próprio

Figura 4.10: Campo de massa de água no interior da estufa (Plano YZ) para secagem a 342,85 K.



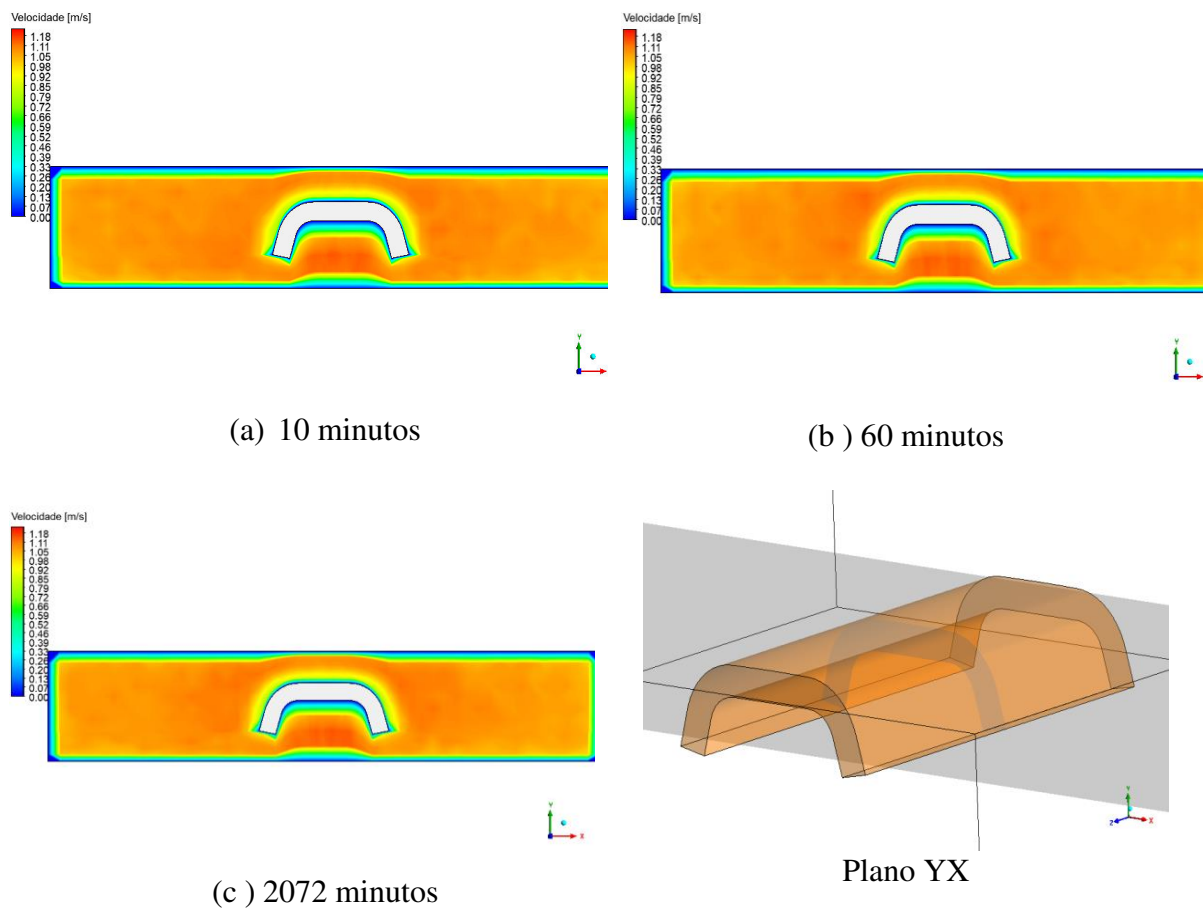
Fonte: Autor próprio

4.4.3 Campo de velocidade do ar

Para o campo de velocidade pode ser notado que em todos os planos o ar de secagem é afetado de forma direta pela configuração da telha cerâmica. É constatado que as regiões mais distantes da telha são as regiões de maiores velocidades. Sendo perceptível que as maiores velocidades são encontradas embaixo, em cima e nas regiões laterais da telha. A velocidade do

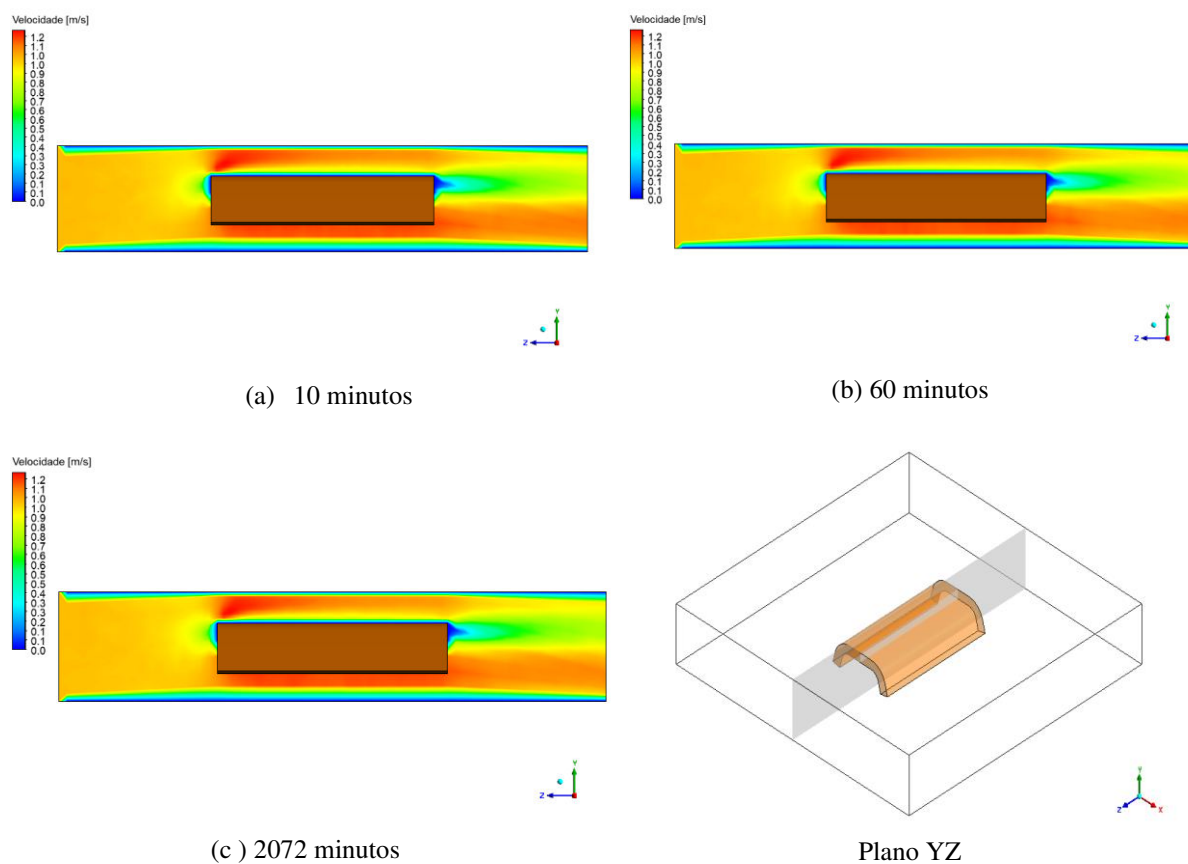
ar é um dos fatores mais relevantes para a cinética de secagem cuja a principal função do escoamento do ar é aquecer o sólido (telha cerâmica), evaporar a água da superfície e retirá-la da camada limite de concentração. Para as simulações realizadas foi observado o campo de velocidade na temperatura 342,85 K no instante de tempo $t=10$ minutos, $t=60$ minutos e $t=2072$ minutos em relação aos planos YX ($Z=0.04$ m) e YZ ($x=0.0$ m). Nas Figuras 4.10 e 4.11 pode ser observada a velocidade do ar no interior da estufa.

Figura 4.11: campo de velocidade do ar no interior da estufa Plano YX para a secagem a 342,85 K.



Fonte: Autor Próprio

Figura 4.12: campo de velocidade do ar no interior da estufa Plano YZ para a secagem a 342,85 K.

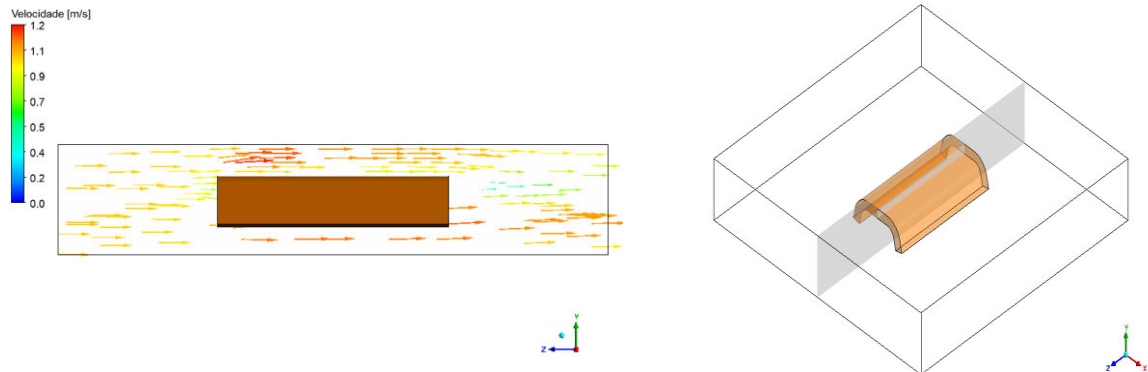


Fonte: Autor próprio

Para uma melhor compressão do caminho que o ar percorre na estufa, o campo de vetores e linhas de corrente é representado com a temperatura de 69.7 °C. Como há uma baixa variação de velocidade, as figuras foram construídas apenas para os primeiros 10 minutos de secagem ($t=10$ minutos).

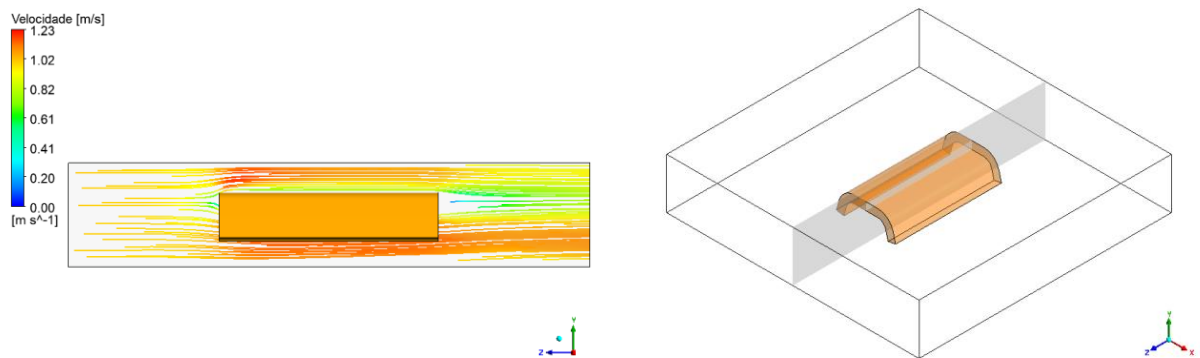
O ar escoa da direita para esquerda podendo observar a formação de vórtices quando o ar passa pela telha. Essa ação comprova a importância da escolha do modelo de turbulência adequada na modelagem matemática. Nas Figuras 4.12 e 4.13 pode ser observado nitidamente os campos vetoriais e linhas de corrente.

Figura 4.13: Campo vetorial de ar no interior da estufa plano YZ (t=10 minutos)



Fonte: Autor Próprio

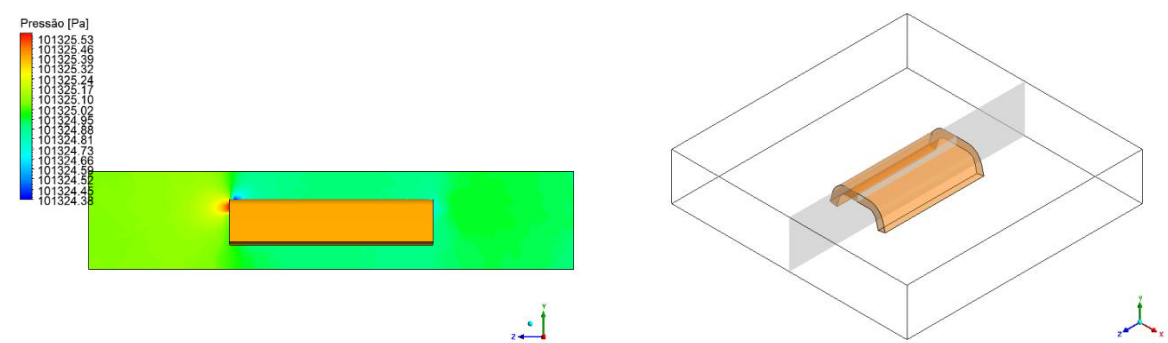
Figura 4.14: Linhas de corrente no interior da estufa plano YZ no instante 10 minutos



4.4.4 Campo de pressão

Com relação à alteração de pressão pode-se notar que ela é muito baixa no decorrer do processo de difusão da massa. Por ser um processo lento e de baixa variação de pressão no interior da estufa, foi utilizado apenas uma temperatura para realizar as análises de pressão no instante (t=10 min) no plano YZ. O motivo desse fenômeno está relacionado ao fato da pressão adotada ser a mesma pressão utilizada para a secagem. Na Figura 4.14 é possível analisar o campo de pressão no interior da estufa no plano YZ.

Figura 4.15: Campo de pressão no interior da estufa Plano YZ Para secagem a 342,85 K.



Fonte: Auto próprio

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 CONCLUSÕES

Conforme os resultados numéricos alcançados para a secagem de telha cerâmicas, é possível concluir que.

- A modelagem matemática sugerida foi apropriada e a temperatura na telha e da massa de água perdida apresentaram um bom rendimento com os dados experimentais.
- Notou-se que a umidade diminui quando há aumentos mais intensos de temperatura.
- Os campos de temperatura e de teor de umidade sobre a superfície da telha mostra sua dependência em relação ao comportamento de secagem em relação ao sentido de escoamento no interior da estufa e suas condições de secagem
- É possível notar que as variações de umidade e de temperatura na superfície da telha. Podendo se observar quais melhores condições de contorno convectiva é mais apropriada para o tipo de secagem utilizado.
- Nota-se que ao aquecer dentro da estufa, o ar quente transfere calor para a telha cerâmica ao passar pelo material, sofrendo uma leve diminuição em sua temperatura se umidificando próximo a superfície da telha cerâmica.
- O campo de velocidade na telha possibilitou analisar a velocidade do ar durante a passagem pela telha. Onde a velocidade do ar é inferior ao passar por baixo da telha, justificando um maior acumulo de umidade e temperatura menos elevada.
- O ar gera vórtices nas extremidades da telha, capacitando observa que é importante escolher o modelo de turbulência adequado na modelagem matemática.
- Devido a velocidade de escoamento ser baixa, a pressão sofrida pelo ar é praticamente nula. É possível confirma pelo campo de pressão.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência da posição da telha no interior da estufa, em relação a cinética de aquecimento de secagem.
- Analisar o comportamento da cinética de secagem em diferentes condições e temperaturas diferentes.
- Implementar a modelagem matemática em outros meios de secagem e à matérias com composições químicas diferentes.
- Verificar o comportamento de secagem de duas ou mais telhas de forma simultânea, para avaliar diferentes campos de temperatura e de umidade do ar no interior da estufa.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM. Informações Técnicas - Processos De Fabricação. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/> . Acesso realizado em 02/06/2022
- ANFACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento). História da cerâmica. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/historia-da-ceramica> . Acesso realizado em 05/06/2022.
- ANICER (Associação Nacional da Industria Cerâmica). Dados do setor.2014. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/> . Acesso realizado em 17/06/2022.
- ARAUJO, Morgana de Vasconcellos. SIMULAÇÃO NUMÉRICA VIA CFD DA SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS INDUSTRIAIS. 2019. 239 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-Pb, 2019.
- BRANCO, P. M. **Minerais Argilosos**. Serviço Geológico do Brasil. São Paulo, 18 ago. 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Minerais-Argilosos-1255.html>. Acesso realizado em 07/003/2022
- BRANCO, P. M. **Minerais Argilosos**. Serviço Geológico do Brasil. São Paulo, 18 ago. 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Minerais-Argilosos-1255.html>. Acesso realizado em 07/003/2022
- BRITO, Antônio Williams de Lima. CERAMICA NA ATUALIDADE. In: BRITO, Antônio Williams de Lima. **Introdução Geral à Tecnologia Cerâmica**: ant. Fortaleza: Ceara, 2011. p. 14-14.
- BUSTAMANTE, Gladstone Motta; BRESSIANI, José Carlos. A indústria cerâmica brasileira. **Associação Brasileira de Cerâmica**, São Paulo, p. 1-2, 3 maio 2000. 1.
- CRUZ, Anyelly Cristina. **OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE TELHAS POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS DO LEAN MANUFACTURING**. 2016. 66 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Produção, Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2016. Cap. 3. Engineering, v. 179, p. 55-67, 2016
- FARIAS, Vera Solange de Oliveira. **DIFUSÃO 3D EM SÓLIDOS COM FORMA ARBITRÁRIA USANDO COORDENADAS GENERALIZADA**. 2011. 303 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011
- GOMEZ, Ricardo Soares; MAGALHÃES, Hortência Luma Fernandes; PORTO, Túlio Rafael Nascimento; LIMA, Elisiane Santana de; SANTANA, Renato Alexandre Costa de; GOMES, Kelly Cristiane; LIMA, Wanderson Magno Paiva Barbosa de; LIMA, Antônio Gilson Barbosa de. Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 9, n. 11, p. 3-4, 3 dez. 2020. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10300>. heat and mass transfer with application to produce drying. Journal of Food

KHAN, F. A.; STRAATMAN, A. G. A conjugate fluid-porous approach to convective
Loyola, L.C. (1998) Programa de capacitação de recursos humanos na indústria
cerâmica do estado do Paraná. Curitiba Más, E. (2002) Qualidade e tecnologia em cerâmica
vermelham-nos combustíveis Editora Polo produções Ltda, São Paulo. 33-48

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

NECKEL JUNIOR, Lorenzo. **PROCESSAMENTO DE TELHAS CERÂMICAS POR COMPACTAÇÃO DE PÓS E QUEIMA EM FORNO A ROLO**. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2008.

RIBEIRO, Manuel J.; FERREIRA¹, António A.L.; LABRINCHA, João A. Aspectos Fundamentais Sobre a Extrusão de Massas de Cerâmicas Vermelhas. Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Aveiro, v. 1, n. 2, p. 39-40, 8 fev. 2003. 1.

SANTOS, Renato Correia dos. **FORMULAÇÃO DE MASSAS CERAMICAS PARA A PRODUÇÃO DE TELHAS**. 2021. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade F e D e R A L de Campina Grande, Campina Grande, 89. Cap. 1.

SANTOS, Rosilda Sousa. **ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DE BLOCOS CERÂMICOS ESTRUTURAIS**: modelagem e simulação. 2019. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

SILVA, L. E. F. dá; NEVES, D. A. de B. Ciência como técnica ou técnica como ciência: nas trilhas da arquivologia e seu status de cientificidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO, 14., 2013, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANCIB, 2013. 1 CD-ROM.

TEIXEIRA-NETO, Érico; TEIXEIRA-NETO, Ângela Albuquerque. Modificação química de argilas: desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado. **Química Nova**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 809-817, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422009000300023>.

VIEIRA, C.M.F., Pinheiro, R.M., Monteiro, S.N. (2022) Massas cerâmicas para telhas: avaliação microestrutural, Revista Matéria, 050-055.