

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG

DANIEL OLIVEIRA AVELINO

**TRANSPORTE DE CALOR E MASSA NA
SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS
VAZADOS**

Campina Grande
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG

DANIEL OLIVEIRA AVELINO

**TRANSPORTE DE CALOR E MASSA NA
SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS
VAZADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:

Fenômenos de Transporte e Energia

Orientador:

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande
2018

A948t

Avelino, Daniel Oliveira.

Transporte de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos vazados /
Daniel Oliveira Avelino. - Campina Grande, 2018.

94 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".

Referências.

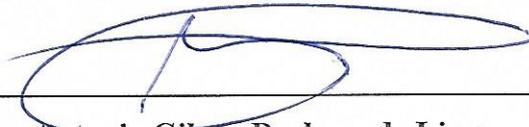
1. Cerâmica. 2. Secagem. 3. Tijolos Vazados. 4. Engenharia Mecânica -
Tensões. 5. Difusão Líquida. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 666.3(043)

TRANSPORTE DE CALOR E MASSA NA SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS VAZADOS

DANIEL OLIVEIRA AVELINO

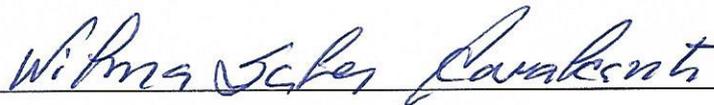
Dissertação Aprovada em 19/11/2018 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

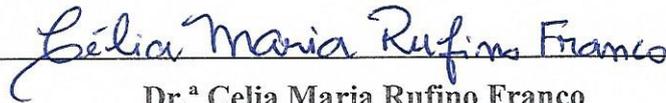
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr.ª Wilma Sales Cavalcanti

Examinadora Interna

PPGEM/UAM/CCT/UFCG



Dr.ª Celia Maria Rufino Franco

Examinadora Externa

UAE/CES/UFCG

*Dedico este trabalho aos
meus pais e a Mayara,
minha querida flor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me ajudar nos momentos de dúvidas e de dificuldades, e por ter me dado a sabedoria, esse dom tão especial.

Agradeço aos meus pais por todo apoio durante minha vida, mesmo diante de todas as dificuldades sempre tentaram me proporcionaram o melhor estudo e educação possível, além disso, agradeço a eles por sempre me ensinarem as maiores lições da vida pelo exemplo.

Agradeço a Mayara Rodrigues Oliveira Avelino, minha amada esposa, por todo apoio e amor dado a minha pessoa, por sempre estar ao meu lado me incentivando e ajudando, por entender todos os meus momentos de ausência e definitivamente por tornar cada dia da minha vida especial que começa sempre ao acorda e admirá-la linda ao meu lado.

Agradeço a todos os meus familiares pela ajuda e compreensão em todos os momentos da minha vida, em especial aos meus tios Afonso da Silva Avelino e Marcelo Trajano, a minha adorável tia Maria de Lurdes Oliveira, ao meu sogro José Arenilson e a minha querida sogra Maria Betânia, tenho certeza que sem a ajuda amorosa, acolhedora, e financeira fornecida por estes, não chegaria onde estou.

Agradeço ao professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pelos ensinamentos, pela paciência, por tornar aquilo que parecia complicado em simples, e por me ensinar o verdadeiro sentido do educador.

À Universidade Federal de Campina Grande por ter cedido o espaço e toda infraestrutura possível para desenvolvimento do trabalho, bem como pela a oportunidade dada de me tornar mestre.

À CAPES pela bolsa de mestrado que me foi concedida durante os primeiros meses de curso. Ao CNPq e à FINEP pelo apoio financeiro concedido ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (CCT/UFCG).

Aos colegas de mestrado e doutorado pela ajuda, conselhos e convivência durante todo esse tempo de curso.

*“A verdadeira herança que
um pai deixa para o seu
filho é a educação, pois
essa nunca se acaba”.*

Francisco de Assis Avelino (meu pai).

RESUMO

A secagem, processo termodinâmico o qual ocorre a redução de teor de umidade do sólido mediante fornecimento de energia, compreende uma das etapas mais importante para fabricação da peça cerâmica, tanto pela energia gasta, quanto pelos efeitos indesejáveis que possam surgir nessa fase. Na fabricação de tijolos cerâmicos, por exemplo, podem surgir danos estruturais como trincas, deformações e empenamentos que diminuem a qualidade do produto final, por isso a importância do seu estudo. Com o estudo das simulações computacionais capazes de prever o comportamento de variáveis como teor de umidade, temperatura e tensões no interior dos tijolos cerâmicos, é possível obter um processo de secagem mais rápido e otimizado, evitando desperdícios de matérias-primas e economia de combustíveis. Buscando melhorias para o processo de secagem de tijolos cerâmicos, este trabalho tem como objetivo principal estudar numericamente o transporte de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos vazados (oito furos), incluindo as tensões termo-hidro-mecânicas. Um modelo matemático tridimensional transiente é apresentado para prever a transferência de massa e calor, baseado na teoria de difusão líquida, e para as tensões internas baseado na lei de Hooke generalizada. A sua solução numérica é obtida pelo método dos volumes finitos. Como resultados são apresentadas as cinéticas de secagem e aquecimento para temperaturas de 50° C, 70° C e 100° C, bem como, os gráficos de distribuição de umidade, temperatura e tensão internas para as mesmas condições. A partir dos resultados, verifica-se que os maiores gradientes de umidade, temperatura e tensões internas ocorrem nas superfícies externas e internas, principalmente nos vértices. Observa-se também que as tensões internas em todos os tempos e para todas as temperaturas analisadas são predominantemente de tração, muito em função da perda de umidade e retração volumétrica. Além disso, o modelo de difusão líquida se mostrou adequado para representar a secagem de tijolos cerâmicos vazados, utilizando-se os coeficientes de difusão mássica e de calor efetivos, que são da ordem de 10^{-9} a 10^{-11} .

Palavras chave: Cerâmica. Secagem. Tijolos Vazados. Tensões. Difusão Líquida.

ABSTRACT

Drying, thermodynamic process which occurs the reduction of moisture content of solid, through energy supply, comprises one of the most important steps for manufacturing the ceramic part, both by the spent energy and by the undesirable effects that may arise in that phase. In the manufacture of ceramic bricks, for example, structural damages such as cracks, deformations and warping can diminish the quality of the final product, therefore the importance of its study. With the study of computational simulations capable of predicting the behavior of variables such as moisture content, temperature and stresses inside the ceramic bricks, it is possible to obtain a faster and more efficient drying process, avoiding raw material wastage and fuel economy. The main objective of this work is to study the heat and mass transport in the drying of hollow ceramic bricks (eight holes), including thermo-hydro-mechanical stresses, in order to improve the drying process of ceramic bricks. A transient three-dimensional mathematical model is presented to predict the mass and heat transfer, based on the liquid diffusion theory, and for the internal stresses based on the generalized Hooke law, since its numerical solution is obtained by the finite volume method. As results, drying and heating kinetics are presented for temperatures of 50° C, 70° C and 100° C, as well as moisture content, temperature and internal stress distribution graphs for the same conditions. From the results, it is verified that the higher gradients of moisture content, temperature and internal stresses occur on the external and internal surfaces, especially at the vertices. It is also observed that the internal stresses at all times and for all the analyzed temperatures, are predominantly tension, much in function of the loss of moisture and volumetric retraction. In addition, the liquid diffusion model proved to be adequate to represent the drying of hollow ceramic bricks using the effective mass and heat diffusion coefficients, which are of the order of 10^{-9} to 10^{-11} .

Keywords: Ceramics. Drying. Hollow Bricks. Stress. Liquid Diffusion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vênus de Dolni Vestonice, uma das primeiras peças em cerâmica feita pelo homem.	21
Figura 2 – Principais polos de cerâmica vermelha nos estados Sul e Sudeste do Brasil.	24
Figura 3 – Produtos de cerâmica vermelha.....	26
Figura 4 – Produtos de materiais de revestimento.	27
Figura 5 – Produtos de cerâmica branca.	27
Figura 6 – Produtos de materiais refratários.	28
Figura 7 – Produtos isolantes térmicos.	29
Figura 8 – a) Fritas. b) corantes.....	29
Figura 9 – Produtos abrasivos.	30
Figura 10 – Produtos de cerâmica avançada.....	31
Figura 11 – Esquema genérico da fabricação de tijolos.	32
Figura 12 – Extração da argila utilizando retroescavadeiras.	33
Figura 13 – Homogeneização e mistura da matéria prima.	34
Figura 14 – Extrusão de tijolos.....	35
Figura 15 – Secagem artificial de tijolos.	36
Figura 16 – Queima dos tijolos.....	37
Figura 17 – Armazenamento dos tijolos para entrega ao cliente.	37
Figura 18 – Eflorescências em tijolos.....	38
Figura 19 – Coração negro em tijolos.	39
Figura 20 – Distorções e trincas após a secagem.....	40
Figura 21 – Fenômeno da secagem.	42
Figura 22 – Fases de secagem da argila.....	43
Figura 23 – Períodos característicos da secagem.....	43
Figura 24 – Tensões normais e cisalhante atuando em uma área de um elemento.	49
Figura 25 – Deformações de um corpo: a) Alongamento. b) Contração. c) Deformação angular.....	50
Figura 26 – Exemplos de estado de tensão: a) Simples. b) Plano. c) Geral.....	51
Figura 27 – Configuração do problema físico: a) Tijolo vazado (8 furos). b) Domínio de estudo.....	54
Figura 28 – Condições de contorno do problema físico.	56
Figura 29 – Tensões principais σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} atuando em um ponto do tijolo.....	58
Figura 30 – Malha numérica utilizada para simulação.	59
Figura 31 – Cinéticas de secagem e aquecimento para as temperaturas de 50° C e 100° C.....	73

Figura 32 – Distribuição do teor de umidade adimensional M^* no plano $x = 24 \text{ mm} (\cong R_1 / 2)$ em 5 min de secagem para as temperaturas de: a) 50°C e b) 100°C .	74
Figura 33 – Distribuição do teor de umidade adimensional M^* no plano $z = 50 \text{ mm} (\cong R_3 / 2)$ em 120 min de secagem para as temperaturas de: a) 50°C e b) 100°C .	75
Figura 34 – Distribuição da temperatura adimensional θ^* no plano $x = 24 \text{ mm} (\cong R_1 / 2)$ em 5 min de secagem para a temperatura de 50°C .	76
Figura 35 – Cinéticas de secagem para as temperaturas de 50°C , 70°C e 100°C com base nos valores da Tabela 3.	78
Figura 36 – Cinéticas de aquecimento para as temperaturas de 50°C , 70°C e 100°C com base nos valores da Tabela 3.	78
Figura 37 – Distribuição do teor de umidade adimensional M^* no plano $x = 24 \text{ mm} (\cong R_1 / 2)$ nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70°C .	79
Figura 38 – Distribuição do teor de umidade adimensional M^* no plano $z = 50 \text{ mm} (\cong R_3 / 2)$ nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70°C .	80
Figura 39 – Distribuição da temperatura adimensional θ^* no plano $x = 24 \text{ mm} (\cong R_1 / 2)$ nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70°C .	80
Figura 40 – Distribuição da temperatura adimensional θ^* no plano $z = 50 \text{ mm} (\cong R_3 / 2)$ nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70°C .	81
Figura 41 – Tensões internas adimensionais em x , $\sigma_x^* = (\sigma_x - \sigma_{\min}) / (\sigma_{\text{adm}} - \sigma_{\min})$, no centro e na superfície externa em função do tempo para as temperaturas de 50°C e 100°C .	83
Figura 42 – Distribuição da tensão interna adimensional $(1 - \sigma_x^*)$ no plano $x = 24 \text{ mm} (\cong R_1 / 2)$ nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70°C .	83
Figura 43 – Distribuição da tensão interna adimensional $(1 - \sigma_x^*)$ no plano $z = 50 \text{ mm} (\cong R_3 / 2)$ nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70°C .	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos matemáticos de parâmetros concentrados utilizados para secagem.	48
Tabela 2 – Parâmetros geométricos e propriedades termofísicas usadas inicialmente nas simulações para as temperaturas de 50° C e 100° C.....	72
Tabela 3 – Propriedades termofísicas revisadas para as temperaturas de 50° C e 100° C e inclusão dos valores para 70° C.	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

adm	Admissível
eq	Equilíbrio
exp	Exponencial
med	Média
MS	Massa seca
vol	Volumétrico

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

a_1, a_2, a_3, a_4	Dimensões de posicionamento do furo do tijolo	[–]
A	Área	[m ²]
A_0, A_1	Constantes empíricas	[–]
B	Termo da equação discretizada aplicada ao ponto P	[–]
c_p	Calor específico a pressão constante	[kJ]/kg·K
d	Derivada total	[–]
D	Difusividade mássica	[m ² /s]
D_{ef}	Difusividade mássica efetiva	[m ² /s]
E	Módulo de Elasticidade	[N/m ²]
f	Fator que caracteriza o esquema temporal	[–]
F	Força	[N]
FACE A, B, ..., N, O	Faces externas e internas do tijolo	[–]
h_m	Coefficiente de transferência convectiva de massa	[m/s]
h_c	Coefficiente de transferência convectiva de calor	[W/m ² ·K]
k	Condutividade térmica	[W/m·K]
l_x, l_y	Dimensões de caracterização do furo do tijolo	[m]
M	Teor de umidade	[kg _{H₂O} /kg _{MS}]
\bar{M}^*	Teor de umidade médio adimensional	[–]
M^*	Teor de umidade adimensional	[–]
np_x	Número de pontos da malha em x	[–]
np_y	Número de pontos da malha em y	[–]
np_z	Número de pontos da malha em z	[–]
$2R_1$	dimensão do sólido em relação à direção x	[m]
$2R_2$	dimensão do sólido em relação à direção y	[m]
$2R_3$	dimensão do sólido em relação à direção z	[m]
\overline{SM}	Termo fonte associado aos termos convectivos	[–]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura de secagem (ar)	[°C]
V	Volume do sólido	[m ³]
x, y, z	Coordenadas cartesianas	[m]

Letras Gregas

∇	Gradiente	[–]
Δ, δ	Varição	[–]
θ	Temperatura do sólido	[°C]
$\bar{\theta}^*$	Temperatura média adimensional do sólido	[–]
θ^*	Temperatura adimensional do sólido	[–]
∂	Derivada Parcial	[–]
Φ	Variável de interesse	[–]

$\bar{\Phi}$	Valor médio da variável de interesse	[–]
Φ''	Fluxo da variável de interesse	[–]
Γ^Φ, ζ	Propriedade do material	[–]
σ	Tensão normal	[N/m ²]
σ_{adm}	Tensão admissível	[N/m ²]
σ_{xx} ou σ_x	Tensão normal atuante na direção x	[N/m ²]
σ_{yy} ou σ_y	Tensão normal atuante na direção y	[N/m ²]
σ_{zz} ou σ_z	Tensão normal atuante na direção z	[N/m ²]
σ_{uv}	Tensor das tensões	[–]
τ	Tensão de cisalhamento	[N/m ²]
ε	Deformação mecânica específica normal	[m/m]
ε_{xx}	Deformação normal ocorrida na direção x	[m/m]
ε_{yy}	Deformação normal ocorrida na direção y	[m/m]
ε_{zz}	Deformação normal ocorrida na direção z	[m/m]
ε_{uv}	Tensor das deformações	[–]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
α	Difusividade Térmica	[m ² /s]
α_{ef}	Difusividade térmica efetiva	[m ² /s]
α_θ	Coefficiente de dilatação térmica linear	[°C ⁻¹]
α_M	Coefficiente de contração hídrica linear	[kg _{MS} /kg _{H₂O}]
$\bar{\gamma}$	Coefficiente de expansão térmica (vol.)	[°C ⁻¹]
$\bar{\beta}$	Coefficiente de contração por umidade (vol.)	[kg _{MS} /kg _{H₂O}]
ν	Coefficiente de Poisson	[–]

Superescritos

Adm	Admissível	
o	Tempo anterior	
Φ	Variável de interesse	
t	Tempo	
n	Interação	
r	Constante empírica	
K	Constante de secagem	[s ⁻¹]
*	Adimensional	

Subescritos

b	Índice genérico dos termos “A” associados aos pontos nodais
eq	Equilíbrio
x	Direção x
y	Direção y
z	Direção z
c	Calor
m	Massa
u, v	Índice dos tensores
o	Inicial
i, j, k	Índice de posição do ponto nodal na malha
e, w, n, s, f, t	Face dos pontos nodais (volume de controle)
E, W, N, S, F, T, P	Pontos nodais (nó)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivo Geral.....	18
1.2	Objetivos Específicos.....	18
1.3	Estrutura da Dissertação.....	18
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1	Histórico da Cerâmica.....	20
2.2	Conceito de Cerâmica.....	22
2.3	Caracterização do Setor.....	23
2.4	Classificação dos Produtos Cerâmicos.....	25
2.4.1	Cerâmica vermelha.....	25
2.4.2	Materiais de revestimento (placas cerâmicas).....	26
2.4.3	Cerâmica branca.....	26
2.4.4	Materiais refratários.....	27
2.4.5	Isolantes térmicos.....	28
2.4.6	Fritas e corantes.....	29
2.4.7	Abrasivos.....	30
2.4.8	Vidro, cimento e cal.....	30
2.4.9	Cerâmica de alta tecnologia/cerâmica avançada.....	31
2.5	Tijolos.....	31
2.5.1	Processo produtivo.....	31
2.5.1.1	Extração da matéria-prima.....	32
2.5.1.2	Preparação da matéria-prima.....	33
2.5.1.3	Conformação mecânica.....	34
2.5.1.4	Processamento térmico.....	35
2.5.1.5	Expedição.....	37
2.5.2	Principais defeitos.....	38
2.6	Secagem.....	41
2.6.1	Processo de secagem.....	41
2.6.2	Teoria e modelos de secagem.....	45
2.7	Tensões.....	48
2.8	Método dos Volumes Finitos.....	52
3	METODOLOGIA.....	54
3.1	Caracterização do Problema.....	54

3.2	Metodologia Matemática.....	55
3.2.1	Modelo para o transporte de calor e massa	55
3.2.2	Modelo para tensões internas	57
3.2.3	Solução numérica.....	59
3.2.3.1	Malha numérica	59
3.2.3.2	Discretização da equação de difusão.....	60
3.2.3.3	Software computacional.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
5.1	Conclusões	86
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	87

1 INTRODUÇÃO

A utilização de produtos cerâmicos pelo homem vem desde o período pré-histórico e durante muito tempo o uso desses produtos, em sua maior parte, era exclusivamente para ambientes religiosos, grandes palácios e utensílios artesanais. No Brasil, estimasse que a atividade cerâmica exista há mais de 2000 anos. Potes, conjunto de pratos, travessas, vasilhas, jarros, copos e outros produtos cerâmicos foram os primeiros a serem fabricados por índios na região Amazônica (SILVA; ANDRADE, 2016).

A essência das técnicas anteriormente utilizadas na produção de cerâmica para uso comum e artístico vem sendo difundida por todo o mundo. Hoje, temos resultados proporcionados pela associação de conhecimentos tecnológicos aos processos produtivos somados à evolução industrial, adoção da produção em massa, gerenciamento de matérias-primas, processos e produtos fabricados, além da introdução de técnicas de gestão (SANCHES; PÓLIS, 2012).

Diante desse crescimento e desenvolvimento, a indústria cerâmica brasileira tem grande importância para o país, tanto na geração de divisas como na geração de empregos. Conforme dados de Sanches e Pólis (2012), atualmente o Brasil possui aproximadamente 418 empresas sejam elas fabricantes, distribuidoras ou representantes de produtos e serviços no setor, além disso, em 2011 o Brasil fechou o ano com o melhor resultado da história, apresentando um crescimento de 12,5% na produtividade do setor cerâmico e alcançando um volume de 844,32 milhões de m², deixando o país na posição de segundo maior produtor mundial, ficando à frente dos polos produtivos da Europa, Itália e Espanha. Isso se deve a vários programas de estímulo do governo quanto à fomentação do mercado imobiliário, incluindo-se os programas de habitação, tendo como exemplo o Minha Casa, Minha Vida. 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 e apresenta faturamento anual de mais de 140 milhões de reais (SINDICER, 2016).

É importante frisar que ao analisar os dados das principais associações representativas do setor de cerâmica do Brasil (ABC e ANICER), encontram-se algumas divergências, entretanto, essas informações corroboram a importância do setor cerâmico no âmbito nacional (ROCHA; PALMA, 2012). Todos esses dados levam em consideração os variados setores da indústria cerâmica, os quais estão compreendidos: cerâmica vermelha, cerâmica branca (louça sanitária,

louça de mesa, isoladores elétricos para alta e baixa tensão, cerâmica artística e cerâmica técnica para fins diversos), materiais refratários (refratários isolantes, isolantes térmicos não refratários e fibras ou lãs cerâmicas), abrasivos, vidro, cimento e cal, cerâmica de alta tecnologia/cerâmica avançada e, por fim, os revestimentos cerâmicos.

Tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos e outros elementos com coloração avermelhada compreendem as cerâmicas chamadas de vermelhas ou estruturais. Em relação ao processo de fabricação desse tipo de peça, diversas etapas são realizadas até chegar ao seu destino final, podendo-se citar as seguintes: dosagem (caixão alimentador), desintegração (moinho desintegrador), mistura (misturador), laminação (laminador), extrusão e corte (maromba), secagem (secador), queima (forno), resfriamento, controle de qualidade, estocagem e comercialização.

Dentre as etapas anteriormente citadas, a secagem que é definida como um processo termodinâmico por meio do qual ocorre a redução do teor de umidade do corpo quando este recebe energia, do ponto de vista industrial, é uma das fases mais importantes e delicadas de todo o processo produtivo cerâmico. A ocorrência de gradientes térmicos e de umidade, durante o processo de eliminação de água, dá lugar ao aparecimento de tensões mecânicas, que estão sujeitas a gerar defeitos nos produtos como deformações e fissuras que os inutilizam, ou baixam os níveis de qualidade (FREITAS, 2007). Além disso, com o consumo de energia na faixa de 8-12% da energia industrial, a secagem é considerada como uma das operações mais energéticas de uma unidade, portanto, em muitos processos de secagem industriais, uma grande quantidade de energia é desperdiçada.

Dessa forma, modelos que descrevem adequadamente os processos de transferência calor e de massa servem de base para estudar processos industriais complexos, facilitar os ensaios experimentais e explicar os mecanismos físicos que estão envolvidos (SILVA, 2012). Em relação ao processo de secagem, tais modelos são baseados nas diversas teorias propostas para descrever o transporte de massa e calor em meios capilares porosos, tais como: teoria da difusão líquida (considerada por muitos pesquisadores como o principal mecanismo de transporte de umidade em sólidos cerâmicos), teoria da vaporização-condensação, teoria capilar, teoria de Kricher, teoria de Luikov, teoria de Philip e De Vrie, teoria de Berger e Pei, e teoria de Fortes e Okos. Cada teoria e, por consequência o modelo adotado, tem seu grau de complexidade e considerações próprias que envolvem desde a estimativa dos valores corretos das propriedades até o próprio mecanismo de transporte envolvido no fenômeno.

Nos dias atuais, por causa dos altos custos tanto dos secadores quanto do processo em si, estudar e entender as teorias e o processo de secagem é de grande interesse científico e tem um

papel importante para a indústria. A utilização de modelos matemáticos que simulam a cinética de secagem de produtos é uma das alternativas adotadas para melhorar a prática de secagem, permitindo diminuir custos, energia, tempo de processamento, defeitos de secagem, contexto o qual o presente trabalho está inserido.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal estudar numericamente o transporte de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos vazados (oito furos), incluindo as tensões termo-hidro-mecânicas.

1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar um modelo matemático e solução numérica para prever a secagem de partículas cerâmicas com forma paralelepípedica, considerando o comportamento de difusão de calor e massa em tijolos vazados;
- Desenvolver um programa computacional para simular a distribuição de temperatura, umidade e tensões termo-hídricas em partículas cerâmicas;
- Simular as cinéticas de secagem e aquecimento e distribuição de temperatura, umidade e tensões termo-hídricas mecânicas no interior do material;
- Avaliar os efeitos das propriedades termofísicas para o modelo de secagem proposto.

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho está dividido em cinco capítulos, os quais são mostradas todas as etapas de desenvolvimento teórico do estudo da secagem de tijolos cerâmicos vazados.

No capítulo 1, apresenta-se a introdução da dissertação, os objetivos (geral e específicos), além da estruturação da dissertação.

O capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, abordando não só tópicos relacionados à cerâmica propriamente dita, tais como: histórico, conceito, classificação, processo produtivo e defeitos dos tijolos, bem como diversos conceitos, teorias e modelos associados ao fenômeno da secagem. Uma abordagem elementar sobre tensões e deformações também é apresentada, assim como, um tópico sucinto sobre o método dos volumes finitos.

No capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada para a simulação da secagem, tendo como principais pontos abordados a caracterização do problema, o modelo matemático para transporte de calor, massa e tensões internas, a solução numérica, a discretização das equações e um pouco sobre o software computacional.

No capítulo 4, apresentam-se os resultados e as discussões das simulações realizadas, a partir de gráficos, considerando diversas condições de secagem. Por fim, o capítulo 5 contém as conclusões e sugestões para trabalhos futuros relacionados ao transporte de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos vazados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Histórico da Cerâmica

A cerâmica é um produto tão antigo que existem indícios de atividade cerâmica em quase todos os povos da antiguidade. No período Pré-neolítico (25.000 a.C.) eram utilizados produtos cerâmicos para cozinha e para construção, conforme demonstrado em diversos estudos arqueológicos.

As peças cerâmicas mais antigas conhecidas por arqueólogos foram encontradas na Tchecoslováquia e em uma área ocupada pela cultura Jomon, no Japão, há cerca de 8000 anos. Eram peças inicialmente simples, destinadas ao armazenamento de grãos e líquidos, evoluindo posteriormente para artigos mais complexos, com bocais e alças elaboradas com imagens em relevo, ou com pinturas vivas que possivelmente passaram a ser considerados objetos de decoração. Imagens em cerâmica de figuras humanas ou humanóides, representando possivelmente deuses, deste período também são frequentes (Figura 1). Após isso, a habilidade na manufatura de peças de cerâmica deixou o Japão e se espalhou pela Europa e pela Ásia, não existindo, entretanto, um consenso sobre como isto ocorreu (SILVA, 2009).

Na China e no Egito, por exemplo, a utilização da cerâmica remonta a mais de cinco mil anos. Nas tumbas dos faraós do antigo Egito, vários vasos de cerâmica continham vinho, óleos e perfumes para fins religiosos. Um dos grandes exemplos da antiga arte cerâmica chinesa está expressa pelos guerreiros de Xian, em 1974 os arqueólogos encontraram no túmulo do imperador Chi-Huand-di, que nasceu por volta do ano 240 a.C, uma réplica em terracota de um exército de soldados em tamanho natural utilizado para decorar esse túmulo. Terracota é o termo empregado para a argila modelada e cozida em forno (ANFACER, 2017).

Com a evolução dos tempos, o homem descobriu e aprimorou diversos produtos cerâmicos que poderiam ser utilizados na construção, um deles foi o tijolo. Estudos revelaram que os tijolos queimados usados para revestimento e muros de proteção surgiram na data de 3000 a.C. Na Babilônia encontraram entre 1600 e 1100 a.C. tijolos queimados e na Grécia encontraram telhas em 430 a.C (SILVA; ANDRADE, 2016). Os gregos, por muitos séculos, produziram as melhores peças de cerâmica do mundo Mediterrâneo. Na Grécia, em Roma e em outras regiões, a produção de cerâmica era vendida nas feiras, e havia uma exportação contínua de ânforas fênicas (vasos de forma geralmente ovóide e com alças) para todo o Mediterrâneo, em virtude da sua forma artística e da sua utilidade para servir água, vinho e azeite (SILVA, 2009).

FIGURA 1 – VÊNUS DE DOLNI VESTONICE, UMA DAS PRIMEIRAS PEÇAS EM CERÂMICA FEITA PELO HOMEM.



Fonte: MDIG (2017)

Assim como os Gregos e Romanos, muitas culturas, desde os primórdios, desenvolveram estilos próprios que, com o passar do tempo, consolidavam tendências e evoluíam no aprimoramento artístico. Estudiosos confirmam que a cerâmica é a mais antiga das indústrias. Ela nasceu no momento em que o homem começou a utilizar o barro endurecido pelo fogo. Esse processo de endurecimento, obtido casualmente, multiplicou-se e evoluiu até hoje. A cerâmica passou a substituir a pedra trabalhada, a madeira e mesmo as vasilhas feitas de frutos como o coco ou a casca de certas cucurbitáceas (porungas, cabaças e catutos) (ANFACER, 2017).

No Brasil, a cerâmica tem seus primórdios na Ilha de Marajó. A cerâmica marajoara aponta à avançada cultura indígena que floresceu na ilha. Estudos arqueológicos, contudo, indicam a presença de uma cerâmica mais simples, provavelmente criada na região amazônica por volta de cinco mil anos atrás. A cerâmica marajoara era altamente elaborada e de uma especialização artesanal que compreendia várias técnicas: raspagem, incisão, excisão e pintura. A modelagem é tipicamente antropomorfa, embora haja exemplares de cobras e lagartos em relevo (ANFACER, 2017). Os índios brasileiros faziam sua cerâmica modelando e, às vezes, usando moldes ou enrolando, mas nunca numa roda; desconheciam, portanto, o torno. Além disso, não

queimavam argila em fornos, mas sim no chão, com lenha, razão pela qual os artefatos recolhidos em sítios arqueológicos possuem coloração escura, o que revela que foram “mal cozidos”. Os artefatos produzidos pelos indígenas brasileiros eram em geral destinados à ornamentação e ao acondicionamento e transporte de líquidos e alimentos (SILVA, 2009).

Dessa forma, a tradição da cerâmica não chegou ao Brasil com os portugueses ou na bagagem cultural dos escravos, como muitos imaginam. Os índios aborígenes firmaram a cultura do trabalho em barro quando Cabral aportou no território. Os colonizadores portugueses foram responsáveis pelo surgimento da primeira fábrica de peças de cerâmica, esses não trouxeram nada de novidade, porém organizaram e centralizaram a mão de obra. Com a modificação do procedimento usado pelos índios e incorporação de rodadeiras, os produtos cerâmicos passaram a serem mais simétrico na sua forma, os acabamentos foram aprimorados e houve a redução de tempo de trabalho (SILVA; ANDRADE, 2016).

Até o século XIX, os sistemas de produção dos tijolos e de outras peças cerâmicas não se modificaram muito. A produção permaneceu manual, a secagem era realizada ao sol e a queima em fornos trapezoidais. Sucessivamente, com o desenvolvimento das primeiras máquinas motrizes à vapor, foi possível mecanizar as operações de extração de matérias primas, preparação e conformação e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de produção. O salto de qualidade e quantidade de produção de tijolos, que não poderiam ter sido sem as máquinas motrizes, foi ainda favorecido pela construção do primeiro forno de anel de Hoffman. A Itália foi a pioneira na aplicação e fabricação de tijolos da era moderna. Com hélices (marombas) que permitiu a fabricação de tijolos e outros produtos em série em quantidade e qualidade, outros países como Espanha, França e Alemanha se destacaram no mercado como produtores de cerâmica vermelha e como fabricantes de equipamentos (SILVA, 2009). Já na segunda metade do século XIX, um grande desenvolvimento ocorreu, quando materiais cerâmicos para isolamento elétrico foram desenvolvidos.

A essência das técnicas anteriormente utilizadas na produção de cerâmica para uso comum e artístico vem sendo difundida por todo o mundo. Hoje, temos resultados proporcionados pela associação de conhecimentos tecnológicos aos processos produtivos somados à evolução industrial, adoção da produção em massa, gerenciamento de matérias-primas, processos e produtos fabricados, além da introdução de técnicas de gestão (SANCHES; PÓLIS, 2012).

2.2 Conceito de Cerâmica

A palavra cerâmica tem origem do termo grego “KERAMOS”, que significa argila queimada ou da expressão “KERAMIKOS”, que significa de argila. Sua definição compreende os materiais inorgânicos, não metálicos, geralmente processados em altas temperaturas. As classes de materiais usualmente consideradas como cerâmicas são óxidos, nitretos, boretos, carbonetos, silicetos e sulfetos. Compostos intermetálicos tais como aluminetos e berílicos são também considerados cerâmicos, assim como os fosforetos, antimonídeos e arsenetos (GY CERAMICS, 2017, tradução nossa).

A existência de várias fases cerâmicas possibilita as combinações de átomos metálicos e não-metálicos que formam muitos arranjos estruturais, e dá origem a materiais cerâmicos com larga aplicação na engenharia. A estrutura do material cerâmico é que define suas propriedades (NASCIMENTO, 2002).

A cerâmica ainda pode ser definida como sendo a principal matéria de utilização em produtos com propriedades isolantes.

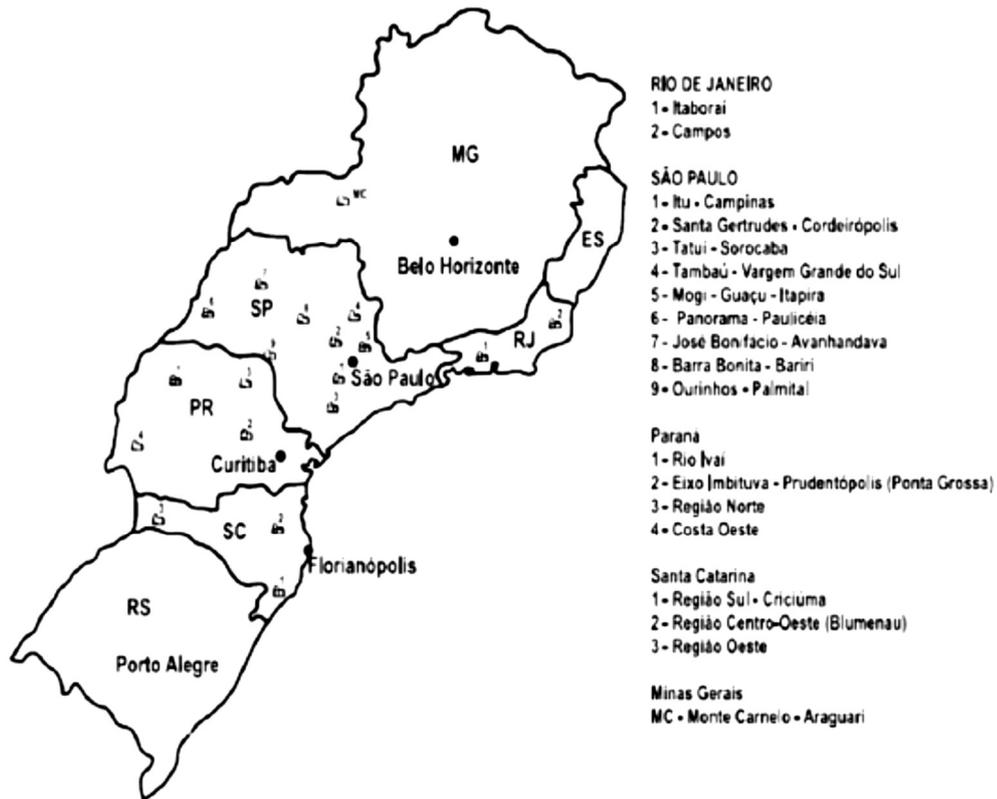
2.3 Caracterização do Setor

A indústria cerâmica brasileira tem grande importância para o país, tanto na geração de divisas como na geração de empregos. Conforme dados de Sanches e Pólis (2012), o Brasil possui aproximadamente 418 empresas sejam elas fabricantes, distribuidoras ou representantes de produtos e serviços no setor. A maioria dessas empresas está concentrada principalmente nas regiões Sudeste e Sul, devido ao fato dessas regiões apresentarem maior densidade demográfica, atividade industrial mais elevada, melhor distribuição de renda, facilidades de matéria prima, energia, universidades, escolas técnicas e centros de pesquisas (ROCHA; PALMA, 2012). Segundo a ASPACER (2012), ao se analisar valores considerando apenas o estado de São Paulo, em 2010 o faturamento do setor foi de R\$3.373,61 bilhões e em 2011, R\$3.786,87 bilhões, representando um aumento de aproximadamente 12%.

Na Figura 2 estão elucidados os polos de cerâmica vermelha mais importantes das regiões Sul e Sudeste, onde estão as principais cerâmicas do país (ROCHA; PALMA, 2012). Entretanto, é relevante ressaltar que as demais regiões do país também têm se desenvolvido, principalmente o Nordeste, onde diversas fábricas de variados setores industriais estão se instalando, e ainda, onde o turismo tem contribuído gradativamente para a construção de vários hotéis (ROCHA; PALMA, 2012). 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 e apresenta faturamento anual de mais de 140 milhões de reais (SINDICER, 2016).

FIGURA 2 – PRINCIPAIS POLOS DE CERÂMICA VERMELHA NOS ESTADOS SUL E SUDESTE DO BRASIL.



Fonte: Rocha; Palma (2012)

Segundo a ANFACER (2012), em 2011 o Brasil fechou o ano com o melhor resultado da história, apresentando um crescimento de 12,5% na produtividade do setor cerâmico e alcançando um volume de 844,32 milhões de m², deixando o país na posição de segundo maior produtor mundial, ficando à frente dos polos produtivos da Europa, Itália e Espanha. Isso se deve a vários programas de estímulo do governo quanto à fomentação do mercado imobiliário, incluindo-se os programas de habitação, tendo como exemplo o Minha Casa, Minha Vida.

Infelizmente como praticamente todos os setores da economia brasileira, atualmente o setor cerâmico sofre com a crise. Segundo Tesseti (2015), de acordo com dados da inteligência de mercado, as vendas de revestimentos cerâmicos, por exemplo, fecharam o ano de 2015 com retração de 1%, havendo ainda possibilidade de piora nesse índice.

O Sindicato da Indústria Cerâmica de São Paulo estima que a cidade deixou de receber R\$ 6 milhões e informa que a produção caiu 20% de 2015 para o ano anterior, além disso, nesse

mesmo ano, 10 cerâmicas já fecharam as portas em todo o Estado (G1, 2015). O SINCERVALE (Sindicato das Indústrias Cerâmicas do Vale do rio Tijucas) afirma que são 35 empresas a menos que em 2014 na região de atuação da instituição, uma redução nas vendas de mais de 20% de 2014 para 2015 (HOROSTECKI, 2016). Já as informações do Sindicato da Indústria Cerâmica para Construção (SINDICER) são de que empresas no estado de Pernambuco estão desativando fornos (algo como fechar uma linha de produção), com unidades completamente paradas e aumentando, dia a dia, a lista de demissões. Há quem já compare o cenário, em deterioração desde 2011, à grande crise vivida pelo segmento na década de 1980, a qual ocorreu um processo de seleção, de tal forma que o empresário que insistir em manter os mesmos métodos de produção e comercialização do passado é sério candidato a fechar as portas (UOL, 2013).

Diante desse cenário, a necessidade de se investir em tecnologias, melhorias de processo, qualificação, equipamentos, logística e gestão, obtendo assim um produto com maior qualidade e valor agregado, torna-se uma saída quase que inevitável para a indústria cerâmica fugir da crise. Desta forma, pesquisas como apresentada neste trabalho são de fundamental importância para que os referidos investimentos sejam feitos da forma correta e alcance os objetivos desejados.

2.4 Classificação dos Produtos Cerâmicos

Segundo a ABCERAM (2017a), o setor cerâmico é vasto e diversificado, podendo assim dividi-lo em sub-setores ou segmentos em função de alguns fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Desta forma, a seguinte classificação, em geral, é adotada.

- Cerâmica Vermelha
- Materiais de Revestimento (Placas Cerâmicas)
- Cerâmica Branca
- Materiais Refratários
- Isolantes Térmicos
- Fritas e Corantes
- Abrasivos
- Vidro, Cimento e Cal
- Cerâmica de Alta Tecnologia/Cerâmica Avançada

2.4.1 Cerâmica vermelha

Compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno. A identificação como cerâmica vermelha se deve pelo fato da mesma apresentar óxido de ferro em abundância que desenvolve a coloração avermelhada conforme apresentado na Figura 3.

FIGURA 3 – PRODUTOS DE CERÂMICA VERMELHA.



Fonte: Milhomens et al. (201-)

2.4.2 Materiais de revestimento (placas cerâmicas)

São aqueles materiais que se apresentam na forma de placas usados na construção civil para revestimento de paredes, pisos, bancadas e piscinas de ambientes internos e externos como apresentado na Figura 4. Recebem diversas denominações, tais como: azulejo, pastilha, porcelanato, grês, lajota, piso, etc. Os revestimentos cerâmicos são importantes, pois tem a função de vedar, isolar (térmica e acusticamente), proteger contra o fogo, bem como, melhorar e estética da construção.

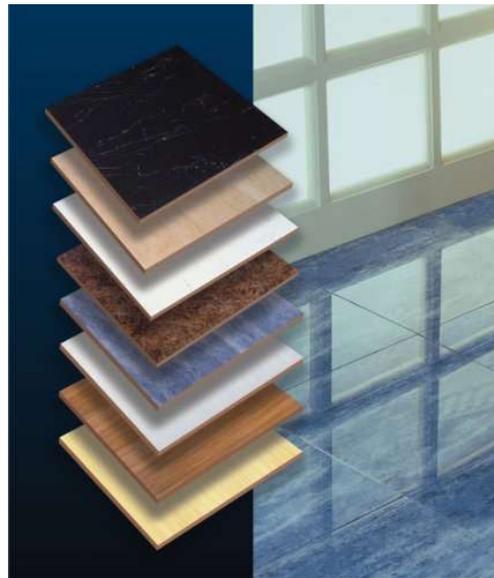
2.4.3 Cerâmica branca

Este grupo é bastante diversificado, compreendendo materiais constituídos por um corpo de coloração branca e em geral recobertos por uma camada vítrea incolor, transparente e que eram assim agrupados pela cor branca da massa, necessária por razões estéticas e/ou técnicas (Figura 5). Após o surgimento dos vidrados opacificados, muitos dos produtos enquadrados neste grupo

passaram a ser fabricados, sem prejuízo das características para uma dada aplicação, com matérias-primas com certo grau de impurezas, responsáveis pela coloração.

Dessa forma é mais adequado subdividir as cerâmicas brancas nos seguintes grupos: louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos para alta e baixa tensão, cerâmica artística (decorativa e utilitária) e cerâmica técnica para fins diversos, tais como: químico, elétrico, térmico e mecânico.

FIGURA 4 – PRODUTOS DE MATERIAIS DE REVESTIMENTO.



Fonte: Milhomens et al. (201-)

FIGURA 5 – PRODUTOS DE CERÂMICA BRANCA.



Fonte: Milhomens et al. (201-)

2.4.4 Materiais refratários

Este grupo abrange diversos produtos, os quais têm como finalidade suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e de operação dos equipamentos industriais,

que na maioria dos casos envolvem esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outros tipos de solicitações. Para suportar essas condições e solicitações, em função da natureza das mesmas, foram desenvolvidos inúmeros tipos de produtos, a partir de diferentes matérias-primas ou mistura destas. Dessa forma, podemos classificar os produtos refratários quanto a matéria-prima ou componente químico principal em: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, mulita, magnesianocromítico, cromítico-magnésiano, carbetto de silício, grafita, carbono, zircônia, zirconita, espinélio e outros. A Figura 6 apresenta alguns produtos feitos de material cerâmico refratário.

FIGURA 6 – PRODUTOS DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS.



Fonte: CBC (2017)

2.4.5 Isolantes térmicos

Os produtos deste grupo geralmente são classificados em:

- a) Refratários isolantes que se enquadram no segmento de refratários;
- b) Isolantes térmicos não refratários, compreendendo produtos como vermiculita expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro e lã de rocha, que são obtidos por processos distintos ao do item a) e que dependendo do tipo de produto pode ser utilizado até 1100° C;
- c) Fibras ou lãs cerâmicas que apresentam características físicas semelhantes as citadas no item b), porém apresentam composições tais como sílica, sílica-alumina, alumina e zircônia, o que permitem a esses produtos serem utilizados em temperaturas de 2000° C ou até superiores.

A Figura 7 apresenta alguns exemplos de isolantes térmicos.

FIGURA 7 – PRODUTOS ISOLANTES TÉRMICOS.



Fonte: CBC (2017)

2.4.6 Fritas e corantes

Estes dois produtos são importantes matérias-primas para inúmeros segmentos cerâmicos que requerem certos tipos de acabamentos. Frita (ou vidrado fritado) é um vidro moído, fabricado por indústrias especializadas a partir da fusão da mistura de diferentes matérias-primas (Figura 8a). É aplicado na superfície do corpo cerâmico que adquire aspecto vítreo após a queima. Este acabamento tem por finalidade aprimorar a estética, tornar a peça impermeável, aumentar a resistência mecânica e melhorar ou proporcionar outras características. Corantes são constituídos de óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos obtidos a partir da mistura de óxidos ou de seus compostos (Figura 8b). Os pigmentos são fabricados por empresas especializadas, inclusive por muitas das que produzem fritas, cuja obtenção envolve a mistura das matérias-primas, calcinação e moagem. Os corantes são adicionados aos esmaltes (vidrados) ou aos corpos cerâmicos para conferir-lhes colorações das mais diversas tonalidades e efeitos especiais.

FIGURA 8 – A) FRITAS. B) CORANTES



Fonte: Papini (201-)

2.4.7 Abrasivos

Os abrasivos de liga (em sua maioria conhecidos como "rebolos") são materiais fabricados pela mistura de um elemento aglomerante e grãos abrasivos, por utilizarem matérias-primas e processos semelhantes aos da cerâmica, constituem-se num segmento cerâmico. Os elementos aglomerantes utilizados são as ligas "vitrificadas" e os grãos abrasivos mais conhecidos são o óxido de alumínio eletrofundido e o carbeto de silício. Alguns produtos abrasivos são mostrados na Figura 9.

FIGURA 9 – PRODUTOS ABRASIVOS.



Fonte: CBC (2017)

2.4.8 Vidro, cimento e cal

São três importantes segmentos cerâmicos e que, por suas particularidades relacionadas às matérias-primas, características de processo, porte e relevância econômica, são muitas vezes considerados à parte da cerâmica.

2.4.9 Cerâmica de alta tecnologia/cerâmica avançada

O aprofundamento dos conhecimentos da ciência dos materiais proporcionou ao homem o desenvolvimento de novas tecnologias e aprimoramento das existentes nas mais diferentes áreas, como aeroespacial, eletrônica, nuclear e muitas outras e que passaram a exigir materiais com qualidade excepcionalmente elevada. Tais materiais começaram a ser desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. Estes produtos, que podem apresentar os mais diferentes formatos, são fabricados pelo chamado segmento cerâmico de alta tecnologia ou cerâmica avançada. Eles são classificados, de acordo com suas funções, em: eletroeletrônicos, magnéticos, ópticos, químicos, térmicos, mecânicos, biológicos e nucleares. Os produtos deste segmento são de uso intenso e a cada dia tende a se ampliar. Como alguns exemplos, podemos citar: naves espaciais, satélites, usinas nucleares, materiais para implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (umidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedor de fogão, etc, conforme exemplos apresentados na Figura 10.

FIGURA 10 – PRODUTOS DE CERÂMICA AVANÇADA.



Fonte: CBC (2017)

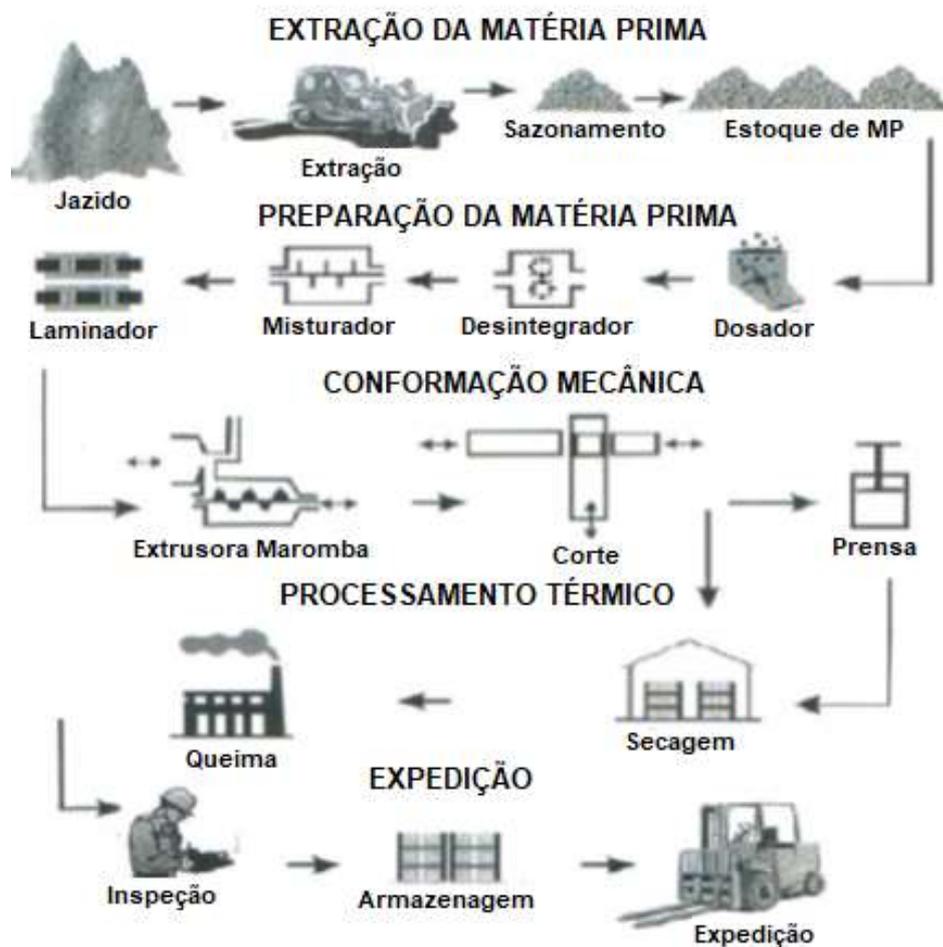
2.5 Tijolos

2.5.1 Processo produtivo

A Figura 11 apresenta de forma genérica, o esquema de fabricação dos tijolos cerâmicos vazados. Esse processo é praticamente comum a maioria dos produtos e empresas de cerâmica vermelha, havendo pequenas variações, de acordo com características particulares de cada matéria-prima ou produto final (SILVA, 2009).

Cada etapa do processo de fabricação de uma peça cerâmica influencia diretamente na qualidade do produto, dessa forma, é importante entender um pouco das referidas etapas, afim de evitar desperdícios, defeitos e conseqüentemente prejuízo para a indústria.

FIGURA 11 – ESQUEMA GENÉRICO DA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS.



Fonte: Adaptado de Silva (2009)

2.5.1.1 Extração da matéria-prima

A principal matéria prima utilizada na cerâmica vermelha é a argila. A argila é um material natural que se encontra em depósitos espalhados na crosta terrestre. Geralmente, a fonte dessa matéria prima encontra-se próximo às empresas e a extração é feita por retroescavadeiras (

Figura 12), após isso, os insumos são transportados das jazidas para os galpões de estocagem.

Na fase de estocagem, algumas cerâmicas possuem seus próprios depósitos de argilas, enquanto outras adquirem de terceiros. Na etapa conhecida como “descanso” ou “sazonamento”, o material passa por mudanças químicas e descompactação, que além de trazer benefícios ao processo produtivo, garante a produção nas épocas chuvosas (SILVA, 2009). Após a mineração, os materiais devem ser beneficiados, isto é, desagregados ou moídos, classificados de acordo com a granulometria e muitas vezes também purificadas. O processo de fabricação, propriamente dito, tem início somente após essas operações.

Figura 12 – Extração da argila utilizando retroescavadeiras.



Fonte: SALEMA (2017)

2.5.1.2 Preparação da matéria-prima

Segundo a ABCERAM (2017b), os materiais cerâmicos usualmente são fabricados a partir da composição de duas ou mais matérias-primas, além de aditivos e água ou outro meio. No caso do tijolo e outros produtos da cerâmica vermelha, para a qual se utiliza apenas argila como matéria-prima, dois ou mais tipos de argilas com características diferentes entram na sua composição. Raramente emprega-se apenas uma única matéria-prima.

Dessa forma, uma das etapas fundamentais do processo de fabricação de produtos cerâmicos é a dosagem das matérias-primas e dos aditivos, que deve seguir com rigor as formulações de massas, previamente estabelecidas. Nessa etapa a argila é levada ao caixão alimentador dosador ou diretamente a correias transportadoras, cujas matérias-primas são proporcionalmente dosadas, dependendo de suas características cerâmicas. Se por acaso, as

argilas forem muito duras e compactadas, estas passam por um desintegrador, que tem função de triturar os aglomerados maiores de argila, de modo a facilitar as operações posteriores (SILVA, 2009).

Após essas fases, a matéria-prima segue para o misturador, equipamento que realiza movimentos circulares, permitindo homogeneização da massa e introdução de água na mistura, para a obtenção da umidade (geralmente de 18 a 30%) e plasticidade adequada para conformação (SILVA, 2009), conforme apresentado na

Figura 13.

Figura 13 – Homogeneização e mistura da matéria-prima.



Fonte: PRIMAVERA (2017)

2.5.1.3 Conformação mecânica

A conformação mecânica consiste na obtenção de tipos de produtos, a partir de uma massa plástica de argila, nas dimensões, formas e espécies mais variadas. Existem vários sistemas de conformação e a escolha do processo depende necessariamente da geometria (forma e dimensão) do produto que se deseja, das propriedades das matérias-primas e conseqüentemente das aptidões destas para um determinado processo. Os principais processos de conformação usados na obtenção dos tijolos cerâmicos são a extrusão e o corte.

Em relação à extrusão (Figura 14), a massa plástica é colocada em uma maromba (extrusora), onde é compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal, através de um bocal

com determinado formato. Como resultado obtém-se uma coluna extrudada, com seção transversal com o formato e dimensões desejados (ABCERAM, 2017b). Geralmente nas extrusoras existe uma câmara de vácuo por onde se retira o ar, a fim de evitar vazios na peça.

Por seguinte, o bloco do material extrudado é contínuo, e cortado nos tamanhos padronizados por meio de cortadeira manual ou automática, acoplada a extrusora, operando em sincronia com o deslocamento do bloco em extrusão obtendo-se os tijolos (OLIVEIRA; BERNILS, 2006).

Figura 14 – Extrusão de tijolos.



Fonte: BELA VISTA (2017)

2.5.1.4 Processamento térmico

De acordo com Silva (2009), o processamento térmico é considerado a etapa mais importante do processo cerâmico e consiste nas operações de secagem e queima das peças já preparadas e conformadas. Nestas operações se dão as transformações de estrutura e composição, responsáveis pela obtenção de propriedades finais, como brilho, cor, porosidade, resistência à flexão, à altas temperaturas, ao ataque de agente químico, entre outras.

Após a etapa de conformação, as peças em geral continuam a conter água, proveniente da preparação da massa, por esse motivo, os tijolos úmidos são transportados para os secadores artificiais, onde são empilhadas em blocos. A secagem é a fase do processo que antecede a queima, e que demanda uma quantidade apreciável de energia térmica para evaporar a água, de

forma lenta e uniforme, que foi necessária adicionar durante o processo de moldagem. O objetivo desta etapa é a redução do teor de umidade dos produtos de 20 a 25% após a extrusão ou prensagem, para 3 a 10% após a secagem, ocorrendo uma contração que pode variar de 4 a 10%.

Apesar de existir secagem natural, a qual as peças são empilhadas em galpões cobertos, dispostos em prateleiras (fixas ou móveis) ou simplesmente empilhadas no chão e a duração da secagem é função das condições de estado do ar atmosférico (temperatura e umidade relativa) e da ventilação do local, a secagem dos tijolos cerâmicos é feita de forma artificial em câmaras de secagem, aproveitando, na maioria dos casos, o calor residual dos fornos (Figura 15). Os tipos mais comuns de secadores artificiais são do tipo estático, contínuo ou semi-contínuo e o período da secagem artificial depende das características da matéria-prima, do formato das peças e do tipo do secador, entretanto há uma variação média de 12 a 40 horas, e também da temperatura de operação que varia em média de 80 a 110°C.

Figura 15 – Secagem artificial de tijolos.



Fonte: ICEMEG (2017)

Após a secagem ocorre a queima ou sinterização dos tijolos (Figura 16), processo no qual o calor provoca transformações físico-químicas na massa argilosa, modificando as características de cru em propriedades cerâmicas. Durante a queima, que pode variar de alguns minutos a vários dias e com uma temperatura da ordem de 750 a 950°C para tijolos, ocorre uma série dessas transformações: perda de massa (por perda de água), desenvolvimento de novas fases cristalinas e soldagem dos grãos. A resistência mecânica, a contração linear, a absorção e a porosidade são aspectos adquiridos não só pela boa uniformidade e controle da massa argilosa e perfeita secagem, mas, também, a partir da boa operação do forno (ANICER, 2008).

Essa etapa é conduzida em equipamentos térmicos denominados fornos, cuja concepção térmica e os combustíveis empregados possuem grande variedade. Os principais tipos de fornos podem ser classificados como: intermitentes (abóboda ou paulistinha, garrafão, chinês, caipira e chama reversível) ou contínuos (Hoffmann ou semi-contínuo e túnel). Assim como a secagem, a queima consome grande parte do combustível utilizado, portanto, um estudo detalhado da mesma é muito importante tanto para questões de otimização do processo, quanto para os aspectos de qualidade do produto (SILVA, 2009).

Após a queima e resfriamento, os produtos passarão para etapa de expedição, última fase antes da utilização propriamente dita.

Figura 16 – Queima dos tijolos.



Fonte: SALEMA (2017)

2.5.1.5 Expedição

A expedição é a fase final do processo produtivo, geralmente composta pelas atividades de inspeção e controle de qualidade, armazenamento e entrega ao cliente, conforme apresentado na (Figura 17). A inspeção e o controle de qualidade são feitos logo após o resfriamento do tijolo que saiu do forno, tendo como objetivo verificar e rejeitar o produto que apresente algum defeito ou parâmetro fora do especificado. O produto, sendo aceito na fase anteriormente citada, é armazenado em área coberta, permanecendo no local até o carregamento para expedição. Por fim a entrega aos clientes é realizada através de caminhões por via rodoviária, utilizando veículos próprios ou serviços terceirizados.

Figura 17 – Armazenamento dos tijolos para entrega ao cliente.



Fonte: BELA VISTA (2017)

2.5.2 Principais defeitos

Durante o processo de fabricação, os tijolos podem apresentar alguns defeitos que são característicos da maioria dos produtos de cerâmica vermelha. Esses problemas ocasionam não só a redução da qualidade do produto, como também a perda do mesmo. Diante disso, os principais defeitos encontrados nos tijolos são:

- a) **Eflorescências:** São provenientes do transporte pela água dos sais solúveis do material até a superfície. Manifestam-se em geral como manchas localizadas mais ou menos intensas de colorações esbranquiçadas ou esverdeadas ou mesmo amarelas, nas superfícies das peças, conforme mostrado na Figura 18. Em geral, apresenta três tipos de origem e incidência: nas matérias primas argilosas, na secagem e na queima (COSTA, 201-).
- b) **Coração negro:** Consiste em uma região escura (geralmente cinza) que se estende, paralelamente à face e próxima à meia altura da espessura, ao longo da peça (Figura 19). A sua origem está relacionada à presença de compostos de carbono (matéria orgânica), óxido de ferro nas argilas e excesso de umidade no pó atomizado (DAMIANI, 2001).

Figura 18 – Eflorescências em tijolos.



Fonte: Costa (201-)

Figura 19 – Coração negro em tijolos.



Fonte: Trindade et al. (2001)

- c) Empenamentos: São distorções observadas no produto acabado que são provocadas por:
- Secagem diferencial: se uma face da peça seca mais rapidamente que a outra se formam gradientes de tensões residuais de contração, que podem deformar o produto.

- Mal posicionamento no suporte de secagem: a colocação de peças verdes sobre suportes planos, para secagem, pode provocar empenamentos no material.
 - Boquilhas de feira: este tipo de empenamentos já se nota após a secagem.
- d) Trincas: As trincas de secagem são pequenas fissuras causadas por secagem rápida. Geralmente inicia-se nas bordas e propagam-se até o centro da peça, sendo mais aberta na borda. As trincas de queima podem ser de aquecimento ou resfriamento. As trincas de aquecimento caracterizam-se por serem pouco sinuosas, abertas e de bordas dentadas, enquanto que as de resfriamento caracterizam-se por serem muito finas de bordas fechadas, normalmente em forma de S.

O trabalho de Silva (2009) mostra diversos experimentos em diferentes condições de secagem os quais distorções e trincas ficam evidentes como mostrado na Figura 20.

Ainda sobre os defeitos nos tijolos, observa-se que muitos se manifestam na saída do secador, tendo sua origem em etapas anteriores do processo produtivo, e sem relação direta com a secagem. Assim, como exemplo, observa-se que uma homogeneização incorreta da pasta, origina retrações locais diferenciais (mais contração onde há mais umidade) que se traduzem em fissuras, problema bastante frequente nos processos de fabricação manuais. Outra causa comum de microfissuras são as laminações que produzem as boquilhas das extrusoras. Para reduzir este problema é aconselhável introduzir um redutor de plasticidade na pasta ou então modificar a geometria do molde para dar uma maior rugosidade. Associado a esse defeito ocorre os vazios, se existe ar incorporado, a orientação preferencial resultante da extrusão funciona como um selante, podendo resultar no inchamento do material.

Figura 20 – Distorções e trincas após a secagem.



Fonte: Silva (2009)

Outros fatores são devidos diretamente à fase de secagem, como a má colocação das peças no secador, ou seja, distribuição e disposição, ou a má aplicação dos vetores de secagem (elevação excessiva da temperatura e alta velocidade de ar).

Por último, vale a pena fazer uma referência ao problema da reabsorção de umidade. Dependendo do tipo de argila, se o tempo transcorrido desde que a argila deixa o secador até quando ela é introduzida no forno, é grande, e a umidade ambiente é muito alta, inicia-se um processo de re-hidratação (reabsorção) que pode provocar rupturas e/ou explosões, quando o material entra no forno (SILVA, 2009).

2.6 Secagem

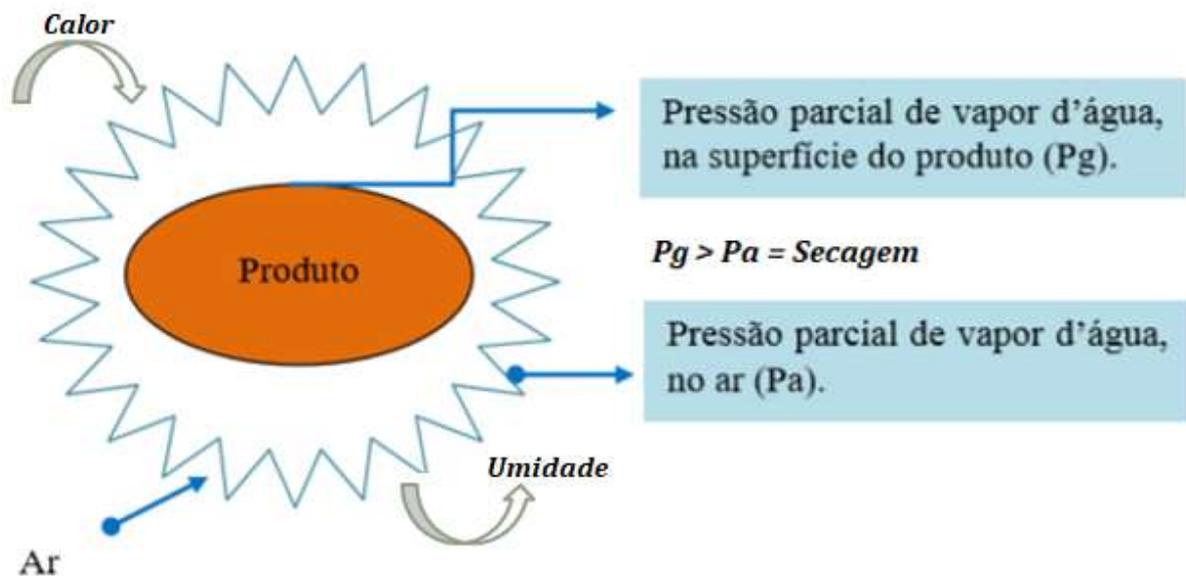
2.6.1 Processo de secagem

A secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução da umidade do sólido, mediante o fornecimento de energia ao mesmo. O transporte de umidade, do interior para a superfície do material pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do produto e do percentual de umidade presente. O controle do processo de desumidificação e o conhecimento do mecanismo do movimento de umidade são fundamentais, uma vez que com

dados de simulação e/ou de experimentais, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (SILVA, 2009).

O processo de secagem diferencia-se de outras técnicas de separação pela maneira como a água é retirada do sólido. Na secagem, a retirada de moléculas se dá por movimentação do líquido e/ou vapor, graças a uma diferença de pressão parcial do vapor d'água entre a superfície do produto e o ar que o envolve (SILVA, 2009). Segundo Novaes (2010), a condição necessária e suficiente para que a mesma ocorra é que a pressão parcial de vapor d'água, na superfície do produto, seja maior que a pressão parcial de vapor d'água no ar, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Fenômeno da secagem.



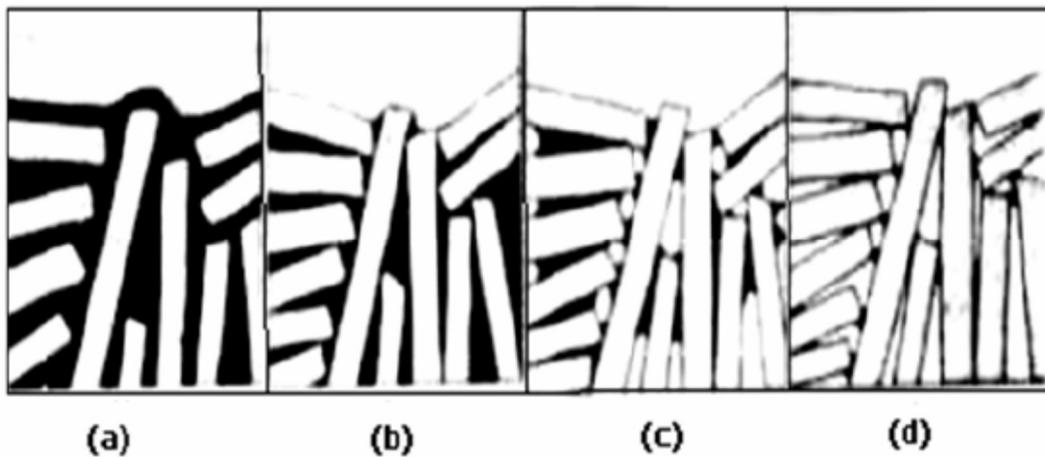
Fonte: Adaptado de Novaes (2010)

No decorrer do processo de secagem, o calor é transferido ao produto por convecção, através do ar, ou por condução, através do contato com uma superfície quente. Esse calor é utilizado para vaporizar o líquido na superfície do sólido ou próximo da superfície se a mudança de estado ocorrer no interior do corpo. O vapor produzido é retirado pelo ar, seja em convecção natural ou forçada. Com a retirada de água da superfície e das camadas mais externas, cria-se um gradiente de concentração internamente ao produto causando um processo migratório de umidade do centro para a superfície. Há ainda, em alguns casos, a vaporização da água no

interior do corpo, ocorrendo, nesse caso, migração de líquido e vapor para a superfície (SILVA, 2012).

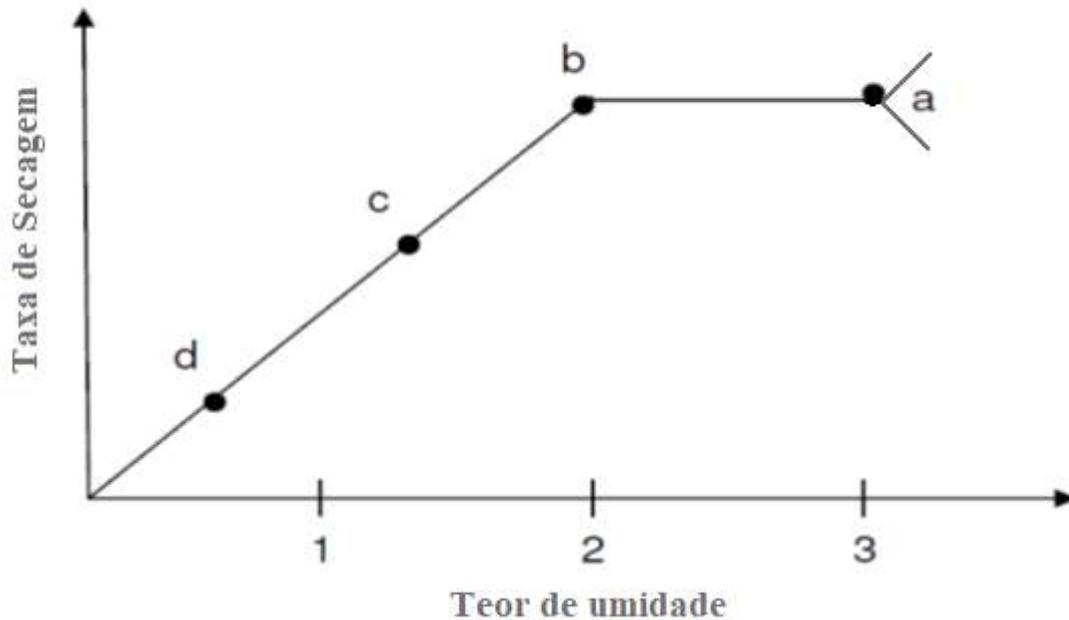
Ao se analisar a secagem de peças cerâmicas, observa-se uma grande quantidade de ar indispensável para cumprir três funções básicas: o transporte do calor necessário à evaporação, o arraste do vapor de água produzido e a redução da camada de vapor saturado formado na superfície da peça. Deve-se analisar a influência da temperatura e da umidade do ar (relação entre a pressão parcial do vapor contido neste ar e a pressão de saturação do vapor na sua temperatura) no processo. Segundo Silva (2009), a pressão de saturação do vapor de água no ar aumenta com a temperatura e quanto mais distante estiver a pressão de saturação da pressão parcial do vapor, maior a capacidade do ar de absorver vapor de água. É importante frisar também, que quando o ar está mais quente diminui-se o volume de ar necessário à secagem, como consequência obtém-se uma economia nos custos do processo.

Figura 22 – Fases de secagem da argila



Fonte: Silva (2009)

Figura 23 – Períodos característicos da secagem



Fonte: Adaptado de Silva (2009)

De uma forma geral, o processo de secagem é dividido em quatro fases distintas, conforme apresentado na Figura 22: adaptação, saída da água coloidal, formação de vazios e expulsão da umidade intersticial, fases estas compreendidas entre dois períodos: com taxa de secagem constante e com taxa decrescente (Figura 23). Na primeira fase ocorre a adaptação do produto às condições ambientais (temperatura, umidade relativa e pressão), nas quais será efetuada a secagem (Figura 22a). Em seguida, evapora a água (coloidal) ocorrendo variações sensíveis das dimensões da peça devido à aproximação das partículas da sua microestrutura (Figura 22b). Ainda nesta fase a água continuamente migra até a superfície da peça, formando constantemente uma película úmida saturada que evapora, tornando assim a velocidade de evaporação aproximadamente constante e função principalmente da porosidade da peça (período com taxa de secagem constante). Na terceira fase ocorre o desaparecimento do filme de água na superfície da peça, que muda de cor. Esta diminuição da quantidade de água que se desloca por capilaridade, ou difusão, acaba por formar vazios no interior da peça, conforme apresentado na Figura 22c, e a quantidade de água evaporada decresce gradativamente, havendo uma consequente redução da velocidade de evaporação e de secagem (período com taxa de secagem decrescente). A última fase da secagem, nem sempre é alcançada nos secadores e muitas vezes sendo executada nos próprios fornos de queima, é a de expulsão das últimas quantidades de umidade de origem intersticial (Figura 22d), na qual a velocidade de secagem diminui até valores próximos de zero (SILVA, 2009).

Ainda analisando o fenômeno de secagem com base nos períodos, observa-se que no período de taxa constante, o material permanece na temperatura de bulbo úmido. A taxa de evaporação na superfície é determinada pela taxa de difusão de vapor de água através do filme estacionário de ar em torno do material, o qual é proporcional à diferença de pressão parcial de vapor de água na superfície do material e o ar de secagem. A taxa de difusão aumenta com o aumento da velocidade do ar e com o decréscimo da espessura do filme de ar.

A partir do momento em que a velocidade do movimento do líquido para a superfície passa a ser menor que a velocidade de transferência de umidade da superfície para o meio, inicia-se o período de taxa de secagem decrescente. A temperatura do sólido nesta fase sofre acréscimo e o vapor proveniente das camadas interiores do sólido, ao difundir-se para a superfície que não está saturada, continua a difundir-se para a corrente gasosa. Este mecanismo é bem mais lento que a transferência convectiva que ocorre na superfície saturada.

A secagem chegará ao estágio em que toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido, e a distância a ser percorrida pelo fluxo de calor e massa aumenta até que a pressão de vapor sobre o sólido passe a ser igual à pressão parcial de vapor do gás secante cessando assim o processo (CHERTMAN, 2007).

2.6.2 Teoria e modelos de secagem

De acordo com Silva (2009), o processo de secagem envolve complexos fenômenos de transferência de calor, massa, quantidade de movimento e variações dimensionais, exigindo a necessidade de desenvolver modelos matemáticos que simule o processo com realismo físico adequado. Para que isso ocorra, é importante inserir no modelo de secagem, o máximo de informações, tais como: mecanismo de transporte de calor e umidade dentro do sólido, coeficiente de difusão, encolhimento, transferência de calor e massa acoplados, condições ambientes externas próximas do sólido, entre outros, tornando possível relacionar corretamente o modelo com a situação real.

Várias teorias de secagem foram propostas para descrever o transporte de massa e calor em meios capilares porosos, tais como: teoria da difusão líquida, teoria da vaporização-condensação, teoria capilar, teoria de Kricher, teoria de Luikov, teoria de Philip e De Vrie, teoria de Berger e Pei, e teoria de Fortes e Okos.

Essas teorias levam em consideração que o fenômeno de migração de umidade no interior do produto pode ser uma combinação de movimentos de umidade por difusão de líquido e/ou de vapor, cada um predominando em certas etapas da secagem (STEFFE; SINGH, 1980 apud

SILVA, 2009). Diversos autores como Fortes e Okos (1980), Strumillo e Kudra (1986), Keeey (1992), Brooker et al., (1992) e Lima (1995) consideram os seguintes mecanismos como os principais para o transporte de umidade:

- Transporte por difusão líquida devido a gradientes de concentração de umidade;
- Transporte por difusão de vapor devido a gradientes de concentração de umidade e pressão parcial do vapor (causado por gradientes de temperatura);
- Transporte por efusão (escoamento Knudsen). Ocorre quando o caminho livre médio das moléculas de vapor for da mesma ordem de grandeza do diâmetro dos poros. É importante para condições de alto vácuo, como por exemplo, liofilização;
- Transporte de vapor por termofusão devido a gradientes de temperatura;
- Transporte de líquido por forças capilares devido a fenômenos de capilaridade;
- Transporte de líquido por pressão osmótica devido a força osmótica;
- Transporte de líquido devido à gravidade;
- Transporte de líquido e de vapor, devido à diferença de pressão total, causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade;
- Transporte por difusão superficial, devido a migração da mistura líquido mais vapor pelos poros da superfície do produto.

Apresentado as teorias e mecanismo envolvidos na secagem, Silva (2009) afirma que dependendo da espessura da camada do material estudado, os modelos matemáticos para descrever tal fenômeno podem ser classificados em modelos de secagem em camada fina (modelos à nível de partícula) e em camada espessa (modelos à nível de secador). A importância prática da secagem em camada fina possui limitações, porque geralmente os materiais são secos em camadas espessas: estacionárias ou em movimento. Os modelos mais usados pelos pesquisadores levam em consideração propriedades termofísicas, cinéticas de secagem e balanço de massa e energia no secador, ratificando assim a necessidade de se dispor de uma equação para a cinética de secagem do material em camada fina em determinadas condições operacionais pré-estabelecidas.

Os diversos modelos de camada fina propostos para descrever a taxa de perda de umidade durante a secagem, podem ser divididos em dois grandes grupos:

- Modelos de análise concentrada;
- Modelos distribuídos.

As equações de secagem em camada fina nos modelos de análise concentrada podem ser classificadas em empíricas, semi-empíricas e teóricas. Estas equações negligenciam os efeitos de variação de temperatura e umidade no interior do material durante o processo de secagem, assumindo que o produto alcança a temperatura média do ar imediatamente no começo do processo, além disso, sempre que esses modelos forem utilizados, deve-se fazer referência aos números de Biot (massa e calor). A Tabela 1 fornece um sumário de alguns dos vários modelos paramétricos empíricos reportados na literatura, que expressam o teor de umidade médio como função do tempo (NOVAES, 2010). Nos casos contrários aos modelos concentrados, têm-se a classe dos modelos distribuídos, aqueles os quais a variação de temperatura e umidade é considerada.

De acordo com Silva (2009), dentre os modelos de análise distribuída, diversos autores consideram a difusão de água líquida como principal mecanismo de transporte de umidade em sólidos cerâmicos. Neste caso, a segunda lei de Fick tem sido bastante utilizada, uma vez que estabelece a difusão de umidade em termos do gradiente de concentração no sólido, conforme Equação 1:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (1)$$

onde M é o teor de umidade, D o coeficiente de difusão e t o tempo.

Em geral o coeficiente de difusão D é considerado constante, ou dependente da temperatura e/ou do teor de umidade do sólido. Contudo, vale salientar que a compressão mecânica reduz a porosidade e a difusividade de umidade efetiva, portanto a pressão tem efeito negativo na difusividade de água (SARAVACOS, 1995 apud SILVA, 2009).

O conceito de difusão líquida como único mecanismo de transporte de umidade tem sido objeto de várias críticas, apresentando constantemente discrepâncias entre os valores experimentais e teóricos. Os principais problemas podem ser atribuídos à consideração do coeficiente de difusão constante, condições de contorno inadequadas e encolhimento do material (LIMA, 1999 apud SILVA, 2009), como também o fato de que a forma do corpo e fenômeno acoplado de calor e massa não são considerados.

O encolhimento do produto durante a secagem é um fenômeno físico observável que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade. Este efeito pode produzir uma influência considerável no coeficiente de difusão de massa, e conseqüentemente na taxa de secagem. No entanto, apesar de alguns autores não considerar o encolhimento, a teoria da difusão líquida tem ganho ao longo do tempo a preferência dos pesquisadores. Segundo Silva (2009), considerando

materiais cerâmicos, podem ser citados como adeptos a essa preferência, Hasatani e Itaia (1992), Nascimento (2002), Cadé et al. (2005), Lucena (2005), Nascimento et al. (2005), Batista; Nascimento (2007), Silva (2007), Silva et al. (2013).

Tabela 1 – Modelos matemáticos de parâmetros concentrados utilizados para secagem.

NOME	MODELO PARÁMETRICO	EQUAÇÃO
Newton	$\bar{M}^* = \exp(-Kt)$	(2)
Page	$\bar{M}^* = \exp(-Kt^r)$	(3)
Henderson e Pabis	$\bar{M}^* = A_0 \exp(-Kt)$	(4)
Geométrico	$\bar{M}^* = A_0 t^{-r}$	(5)
Wang e Singh	$\bar{M}^* = 1 + A_0 t + A_1 t^2$	(6)
Midilli et al	$\bar{M}^* = A_0 \exp(-Kt^r) + A_1 t$	(7)
Logarithmic	$\bar{M}^* = A_1 + A_0 \exp(-Kt)$	(8)

Fonte: Novaes (2010)

onde A_0, A_1 e r são constantes empíricas, K é a constante de secagem, \bar{M}^* é o teor de umidade médio adimensional e t é o tempo.

Uma outra teoria bastante citada considerando os modelos distribuídos, baseia-se na termodinâmica dos processos irreversíveis e propõe que a água se move em meios capilares porosos, em condições isotérmicas, sob a ação de um gradiente de potencial de transferência de massa. Esse potencial de transferência de massa foi proposto por Luikov por analogia com a força motriz de transferência de calor, o gradiente de temperatura. Silva (2009) afirma que Luikov apresentou um modelo matemático para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos baseado nos mecanismos de difusão, efusão, convecção de vapor e difusão e convecção de água no interior do meio poroso. O processo é descrito por um sistema de equações diferenciais parciais acopladas para a temperatura, umidade e em casos de intensas secagem também a pressão. Nesse mesmo sentido caminha o modelo proposto por Fortes e Okos (1980) para descrever o transporte de líquido e vapor no interior do sólido. Ainda de acordo com Silva (2009), podem ser encontradas mais discussões sobre estes modelos de secagem em Alvarenga et al. (1980), Parry (1985), Keey (1992), Parti (1993), Lima (1999), Oliveira (2001), Oliveira; Bernils (2006), Oliveira; Lima (2009) e Park et al. (2014).

2.7 Tensões

Considera-se a definição mais simples de tensão, como sendo a relação da força (F) aplicada em um corpo dividido pela área (A) a qual essa força está sendo aplicada, conforme apresentado na Equação 9:

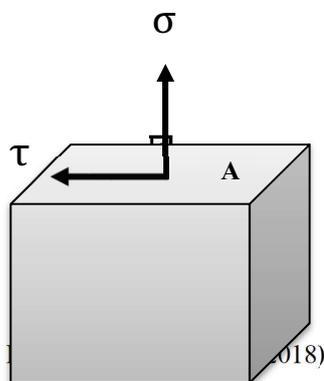
$$\text{Tensão} = \frac{F}{A} \quad (9)$$

Supondo que o corpo é contínuo, sem vazios, e que a análise das tensões pode ser feita em cada seção dos vários elementos que constitui o mesmo, a Equação 9 é melhor definida como tensão média da seguinte forma:

$$\text{Tensão}_{\text{med}} = \frac{F}{A} \quad (10)$$

Quando as forças atuam no sentido perpendicular à área (força de tração ou compressão), as tensões são denominadas tensões normais (σ), já quando essas forças atuam tangente à área, as tensões resultantes são conhecidas como tensões de cisalhamento (τ), conforme ilustrado na Figura 24. As tensões normais e de cisalhamento são provenientes apenas por carregamentos mecânicos propriamente ditos, no entanto, existem outros tipos de tensões oriundas de efeitos não mecânicos que devem ser consideradas de acordo com o caso analisado, como por exemplo as tensões térmicas e hídricas, objeto de estudo do presente trabalho. As tensões térmicas e hídricas são estabelecidas como resultado de gradientes de temperatura e umidade ao longo de um corpo, as mudanças de temperatura e teor de umidade acontecem mais rapidamente na parte exterior do que no interior, de tal forma que as variações diferenciais das dimensões servem para restringir a livre expansão ou contração de elementos de volume adjacentes no interior da peça, resultando no aparecimento das referidas tensões.

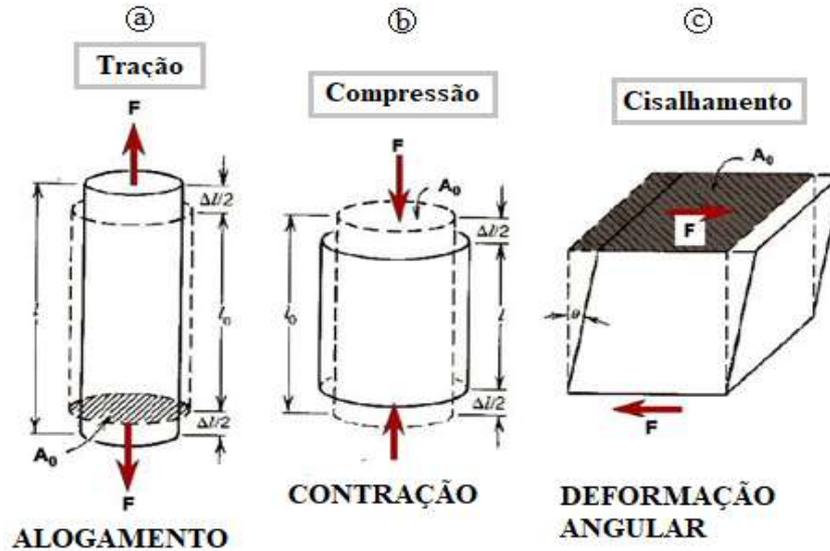
Figura 24 – Tensões normais e cisalhante atuando em uma área de um elemento.



Com o conceito de tensão em mente, é de suma importância frisar que a partir da aplicação de uma tensão, o corpo sofre deformações (permanentes ou não) que tende a mudar seu tamanho e sua forma original. De forma similar as tensões, as deformações podem ser normais, quando

o corpo se alonga por tração (Figura 25a) ou se contrai devido à compressão (Figura 25b), ou deformações por cisalhamento, nesse caso o corpo se deforma angularmente (Figura 25c).

Figura 25 – Deformações de um corpo: a) Alongamento. b) Contração. c) Deformação angular.



Fonte: Adaptado de Dias (2011)

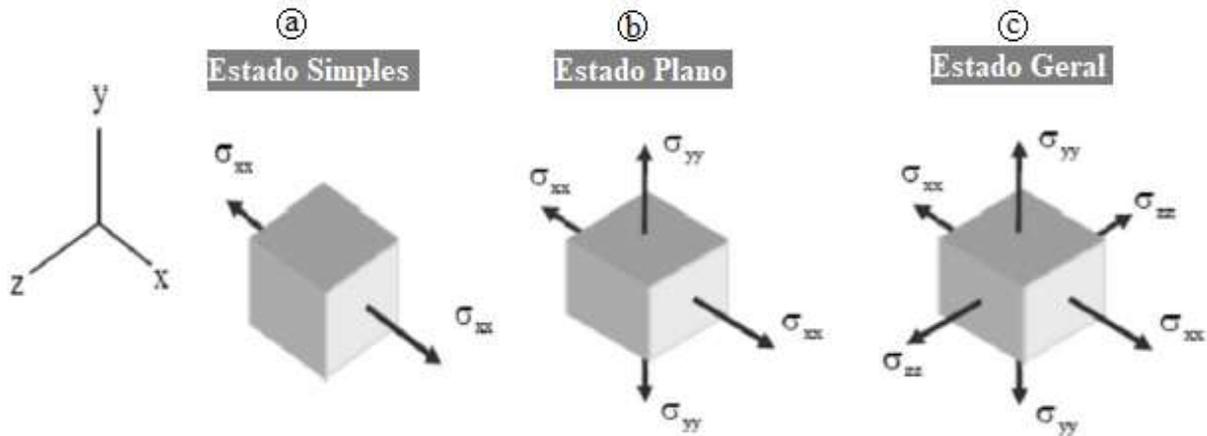
O conhecimento das componentes normais e tangenciais das tensões e, conseqüentemente, das deformações em todos os planos, define o estado de tensão de um ponto material do corpo. Existem três tipos de estado de tensões (simples, plano e geral) que podem ser considerados em uma análise de acordo com a aplicação, praticidade e resultados satisfatório que se deseja obter na mesma. O estado simples ou uniaxial de tensão é aquele em que as tensões atuam apenas em uma única direção. O estado plano ou biaxial é o mais usual a ser considerado nas aplicações, pois leva em conta a aplicação de tensões em duas direções distintas, sejam elas normais ou tangenciais, tornando seus cálculos razoavelmente simples. Já o estado geral ou triaxial de tensão é o mais complexo de todos em termos de análise matemática, devido ao fato de que as tensões atuam nas três direções do elemento material, sendo necessária a análise computacional/numérica para sua avaliação. A Figura 26 ilustra exemplos de estado simples, plano e geral para um determinado elemento de um corpo, considerando apenas tensões normais.

Outro ponto importante em relação ao estudo das tensões trata-se da teoria da elasticidade. Essa teoria considera que os corpos se deformam sob ação de uma força externa, mas que dentro de um certo limite ao cessar a referida força, as deformações desaparecem. A análise mais comum dentro da teoria da elasticidade é feita através da conhecida lei de Hooke para as tensões normais, apresentado na Equação 11:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (11)$$

onde E é o módulo de elasticidade ou de Young e ε é a deformação específica normal.

Figura 26 – Exemplos de estado de tensão: a) Simples. b) Plano. c) Geral



Fonte: Adaptado de Romanini (2016)

Ao se estudar um corpo como o tijolo, as equações de tensões da teoria da elasticidade levam em consideração não só as deformações em três dimensões, como também os efeitos que uma determinada deformação longitudinal pode acarretar nas porções transversais desse elemento. Esse efeito é traduzido através do coeficiente de Poisson ν e a lei de Hooke generalizada para um corpo tridimensional é apresentada nas Equações 12 a 14 (TIMOSHENKO; GOODIER, 2010):

$$E\varepsilon_{xx} = \sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (12)$$

$$E\varepsilon_{yy} = \sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) \quad (13)$$

$$E\varepsilon_{zz} = \sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (14)$$

As deformações térmicas e hídricas provenientes da variação de temperatura e umidade durante a secagem de um elemento, por exemplo, podem também ser introduzidas nas Equações 12, 13 e 14 da seguinte forma:

$$E(\varepsilon_{xx} - \alpha_{\theta x}\Delta\theta - \alpha_{Mx}\Delta M) = \sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (15)$$

$$E(\varepsilon_{yy} - \alpha_{\theta y}\Delta\theta - \alpha_{My}\Delta M) = \sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) \quad (16)$$

$$E(\varepsilon_{zz} - \alpha_{\theta z}\Delta\theta - \alpha_{Mz}\Delta M) = \sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (17)$$

onde α_{θ} é o coeficiente de dilatação térmica linear, α_M é o coeficiente de contração hídrica linear, $\Delta\theta$ é a variação da temperatura e ΔM é a variação do teor de umidade.

Tendo em vista todas as definições anteriores, a análise de tensões estará completa com a determinação das maiores tensões aplicadas em um determinado plano de um ponto material e posteriormente a quantificação dessas tensões para todos os elementos do corpo. Tais tensões são de caráter normal, denominadas de tensões principais e os planos de atuação das mesmas conhecidos como planos principais. Usualmente utiliza-se o ciclo de Mohr ou fórmulas definidas para a determinação dessas tensões, conforme apresentado por Hibbeler (2010). Além disso, é sempre importante combinar o estado de tensão em um ponto do material, aliado ao comportamento de falha que o mesmo apresenta (dúctil ou frágil). Os critérios de falha mais conhecidos para esses tipos de materiais são os de Tresca, Von Mises e Rankine, conforme apresentado e pormenorizados por Guilherme (2016).

2.8 Método dos Volumes Finitos

O método de volumes finitos (MVF) ou *Finite Volume Method (FVM)* em inglês, foi introduzido na década de 1970 e historicamente tem sido o método preferido pelos cientistas e engenheiros que trabalham com problemas de transferência de calor e mecânica de fluidos, devido a sua versatilidade e estabilidade das simulações (OSSES, 2016).

Neves e Yuri Shalom (2013) consideram a definição simplificada do método dos volumes finitos como sendo um método de solução de equações diferenciais parciais na forma de equações algébricas. Derivado do Método dos Elementos Finitos (MEF), o MVF também faz uso de pequenos elementos, os quais menores possíveis, resultam em melhores aproximações dos resultados quando comparados aos valores obtidos por uma solução exata das equações de governo do fenômeno físico investigado.

A característica marcante do MVF é que a solução resultante satisfaz a conservação de quantidades como massa, quantidade de movimento, energia e espécies. Esta característica é totalmente satisfeita para qualquer volume de controle, assim como é válida para todo o domínio computacional. Mesmo a solução em uma malha grosseira apresenta conservação das variáveis integradas.

A aproximação com o MVF é talvez a de compreensão mais simples, pois todos os termos que precisam ser aproximados têm significado físico. O procedimento básico de aplicação do método dos volumes finitos pode ser descrito pelos seguintes passos (OSSES, 2016; NEVES; YURI SHALOM, 2013):

1. Identificar o domínio ou limites da região que acontece o fenômeno investigado;

2. Dividir ou discretizar o domínio avaliado em pequenas partes ou volumes localizando no centróide de cada volume o qual a variável que será calculada;
3. Formular as equações integrais de conservação para cada volume de controle;
4. Aproximar numericamente as integrais;
5. Aproximar os valores das variáveis nas faces e as derivadas com a informação das variáveis nodais;
6. Montar e resolver o sistema algébrico obtido;

Todos os passos mencionados anteriormente são apresentados e detalhados no capítulo 3 que se segue, tendo como enfoque os tijolos cerâmicos vazados e assegurando o caráter de replicabilidade para outros elementos que se deseja estudar.

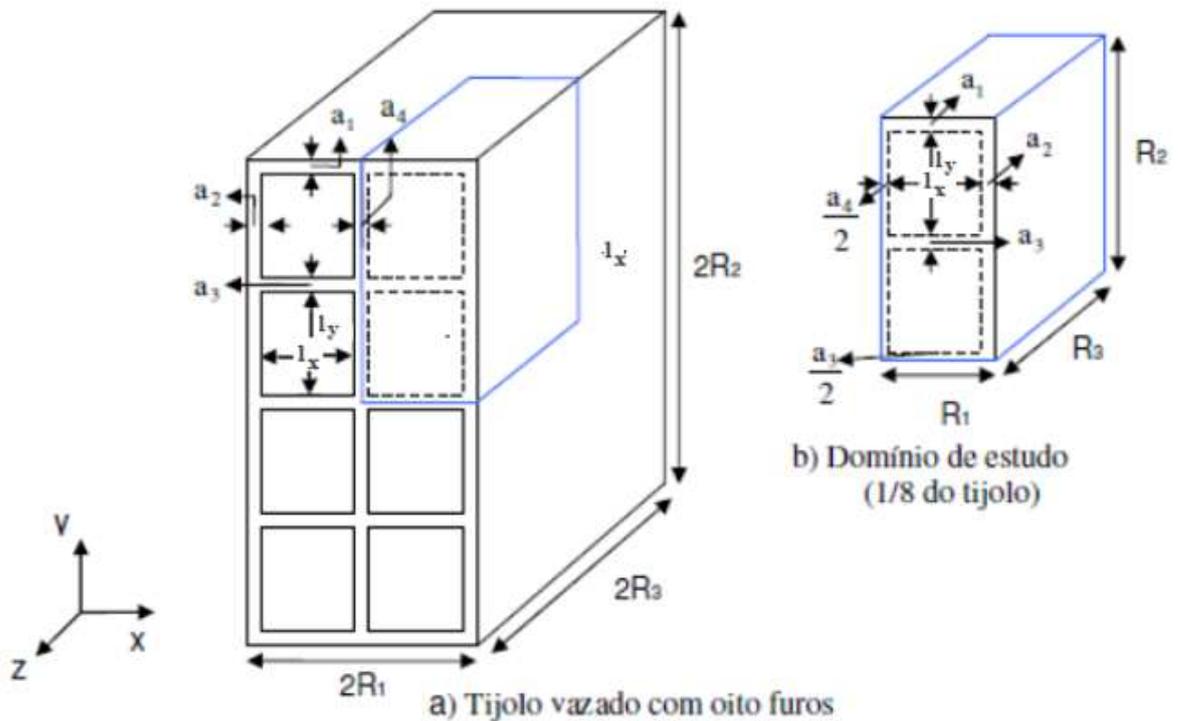
3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização do Problema

Para descrever a secagem de tijolos cerâmicos vazados considerou-se o modelo de difusão líquida. Nesse modelo, conhecendo as características do material e do meio externo, foi possível determinar o campo de temperatura e o teor de umidade do corpo em um dado instante de tempo. Já para as tensões no interior do tijolo, relativas ao fenômeno de secagem, considerou-se o modelo segundo a teoria da elasticidade e a partir dos valores de temperatura e umidade, determinar as tensões termo-hídricas e avaliar os possíveis efeitos durante a secagem dos tijolos em estudo.

A Figura 27a apresenta o tijolo vazado de oito furos a ser analisado. As dimensões totais desse tijolo são $2R_1 \times 2R_2 \times 2R_3$, o posicionamento dos furos é definido por a_1, a_2, a_3, a_4 , enquanto que l_x e l_y definem o tamanho das aberturas. Já a Figura 27b representa o domínio de estudo, considerando apenas $1/8$ do volume do tijolo, em virtude da sua simetria geométrica.

Figura 27 – Configuração do problema físico: a) Tijolo vazado (8 furos). b) Domínio de estudo



Fonte: Adaptado de Silva (2009)

Definido o objeto de estudo, a modelagem matemática envolvida na secagem de tijolos cerâmicos vazados é apresentada em detalhes, tendo em vista algumas considerações e condições de contorno necessárias para sua completa caracterização. A malha numérica e todas as equações envolvidas no problema, bem como a solução numérica, é obtida utilizando a técnica dos volumes finitos.

3.2 Metodologia Matemática

3.2.1 Modelo para o transporte de calor e massa

O processo de difusão transiente de massa e calor em tijolos cerâmicos vazados pode ser descrito através da equação geral de difusão, representado pela Lei de Fick para difusão de massa e pela Lei de Fourier para transferência de calor.

Para modelar o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados com oito furos, as seguintes considerações foram feitas:

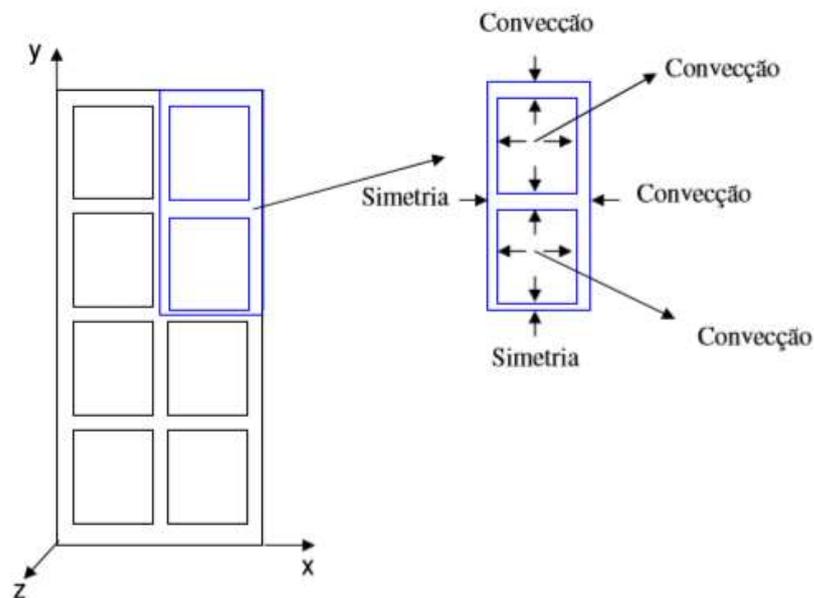
- Propriedades termofísicas e mecânicas constantes;
- A água migra no interior do sólido na forma líquida e evapora na superfície;
- Geração interna de massa e de calor desprezíveis;
- O tijolo é constituído de água na fase líquida e matéria sólida;
- Corpo homogêneo e isotrópico;
- As variações dimensionais foram consideradas pequenas, assumindo que o material se contrai linearmente com a mudança do teor de umidade;
- As tensões no interior dos tijolos são consideradas provenientes das tensões hídricas e térmicas que surgem no tijolo devido às variações do teor de umidade e da temperatura, respectivamente;
- Condição de contorno convectiva na superfície do sólido, com teor de umidade, temperatura, dimensões do corpo e tensões internas dependendo da posição e do tempo;
- O campo do teor de umidade e temperatura no interior do corpo é uniforme no início do processo;
- Os coeficientes de transferência de massa e de calor convectivos são constantes para todas as faces do sólido.

Tendo em vista as considerações anteriormente apresentadas, a equação diferencial parcial geral, em coordenadas cartesianas e em função da variável $\Phi(x, y, z, t)$, que governa o fenômeno difusivo no interior do tijolo, é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\zeta\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) \quad (18)$$

Desde que a Equação 18 é uma equação tridimensional transiente, necessita-se de, no mínimo, seis condições de contorno e uma condição inicial. Conforme a Figura 27b, o sólido apresenta simetria, de tal forma que apenas 1/8 do seu volume é utilizado para aplicação de tais condições. Sendo assim, de acordo com a configuração física do problema ilustrado na Figura 28, as condições iniciais, de simetria e de contorno são dadas por:

Figura 28 – Condições de contorno do problema físico.



Fonte: Silva (2009)

a) Condição inicial:

$$\Phi(x, y, z, t = 0) = \Phi_0 \quad (19)$$

b) Condição de simetria:

$$\frac{\partial\Phi(x = 0, y, z, t)}{\partial x} = \frac{\partial\Phi(x, y = 0, z, t)}{\partial y} = \frac{\partial\Phi(x, y, z = 0, t)}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

c) Condição convectiva nas superfícies interna e externa do tijolo (Face Direita como referência):

$$-\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi(x, y, z, t)}{\partial x} = h[\Phi(x, y, z, t) - \Phi_e] \quad (21)$$

Nas equações apresentadas anteriormente e nas que se seguem, para o caso de transferência de calor $\Gamma^\Phi = k$, $\zeta = \rho c_p$, $h = h_c$ e $\Phi = \theta$ (a temperatura do sólido), enquanto que para transferência de massa, $\Gamma^\Phi = D$, $\zeta = 1$, $h = h_m$ e $\Phi = M$ (o teor de umidade do sólido).

3.2.2 Modelo para tensões internas

As tensões no interior de tijolos, durante a secagem, são dadas pela soma das tensões térmicas decorrentes da temperatura e das tensões hídricas decorrentes do teor de umidade M , como segue (KEUM et al., 2000a; KEUM et al., 2000b; KEUM; OH, 2005):

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{uv}} = E(\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{uv}} - \bar{\gamma}\Delta\theta - \bar{\beta}\Delta M) + \boldsymbol{\sigma}_0 \quad (22)$$

onde $\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{uv}}$ é o tensor das tensões, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{uv}}$ é o tensor das deformações, $\boldsymbol{\sigma}_0$ é a tensão inicial, $\bar{\gamma}$ é o coeficiente de expansão térmica volumétrico, $\bar{\beta}$ é o coeficiente de contração por umidade volumétrico.

A Equação 22 tem como base a teoria da elasticidade apresentado na seção 2.7, e ao ser analisada nas três direções x , y e z , considerou-se que:

- Nenhuma tensão inicial $\boldsymbol{\sigma}_0$ atua no tijolo;
- As deformações mecânicas são desprezíveis $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = 0$;
- As tensões internas σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} são originadas apenas pelas deformações térmicas e hídricas sofridas pelo corpo durante a secagem e encolhimento;
- As deformações térmicas e hídricas possuem particularmente uma natureza de expansão ou contração, respectivamente, que mudam o volume dos elementos e não causam nenhum cisalhamento, de maneira que o formato do elemento permanece inalterado;
- Não há tensões de cisalhamento, de forma que as tensões mecânicas σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} são as próprias tensões principais, ou seja, as máximas tensões normais em cada ponto do tijolo (Figura 29).

Desta forma, a partir destas considerações e usando a Equação 22, as tensões normais nas direções x , y e z podem ser dadas por:

$$E(-\alpha_{\theta x}\Delta\theta - \alpha_{Mx}\Delta M) = \sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (23)$$

$$E(-\alpha_{\theta y}\Delta\theta - \alpha_{My}\Delta M) = \sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) \quad (24)$$

$$E(-\alpha_{\theta z}\Delta\theta - \alpha_{Mz}\Delta M) = \sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (25)$$

Considerando $\alpha_{\theta x} = \alpha_{\theta y} = \alpha_{\theta z} = \alpha_{\theta}$, $\alpha_{Mx} = \alpha_{My} = \alpha_{Mz} = \alpha_M$, $\sigma_{xx} = \sigma_x$, $\sigma_{yy} = \sigma_y$, $\sigma_{zz} = \sigma_z$, isolando-se σ_x na Equação 23, σ_y na Equação 24 e combinando-as, obtém-se:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{[E(-\alpha_{\theta}\Delta\theta - \alpha_M\Delta M) + \nu\sigma_z]}{1 - \nu} \quad (26)$$

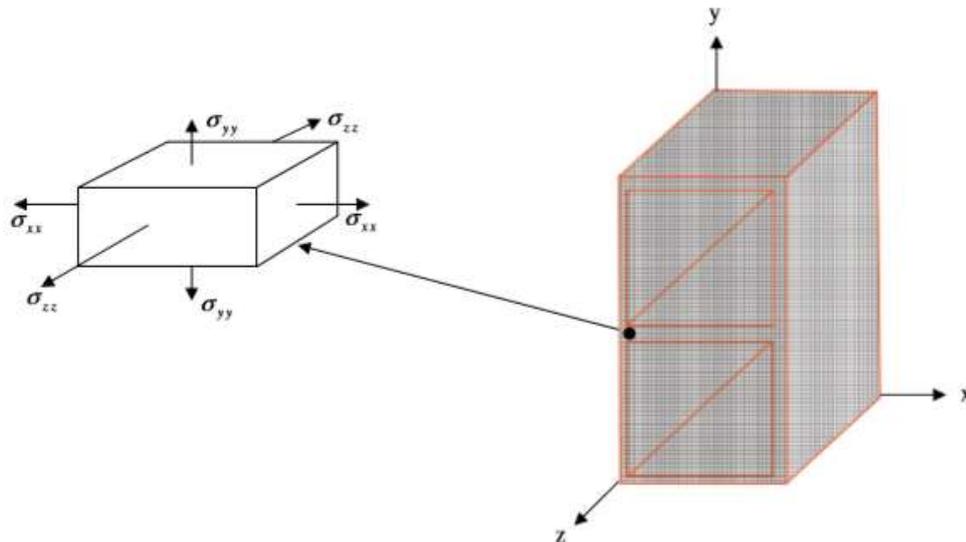
Com isso, σ_z é facilmente encontrado substituindo σ_x e σ_y na Equação 25, de tal forma que:

$$\sigma_z = \frac{E[(-\alpha_{\theta}\Delta\theta - \alpha_M\Delta M)]}{1 - 2\nu} \quad (27)$$

Retornando à Equação 26, com o valor de σ_z já encontrado, conclui-se que:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \frac{E[(-\alpha_{\theta}\Delta\theta - \alpha_M\Delta M)]}{1 - 2\nu} \quad (28)$$

Figura 29 – Tensões principais σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} atuando em um ponto do tijolo.



Fonte: Silva (2009)

Obtendo-se a solução numérica da equação de difusão, encontra-se o teor de umidade e temperatura para cada volume de controle e na superfície, e com isso pode-se facilmente descobrir as tensões atuante em cada volume de controle, através da Equação 28, já que estas são dependentes apenas de constantes e de $\Delta\theta$ e ΔM . Conseqüentemente, com os valores das tensões internas em todos os pontos, obtém-se a distribuição das mesmas ao longo do tijolo, podendo-se fazer uma análise dos possíveis efeitos dessas tensões. Os valores de $\Delta\theta$ e ΔM são encontrados pela diferença da variável (θ ou M) no tempo atual e um valor de referência (por exemplo, um valor inicial) de tal forma que se pode escrever: $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ e $\Delta M = M - M_0$.

3.2.3 Solução numérica

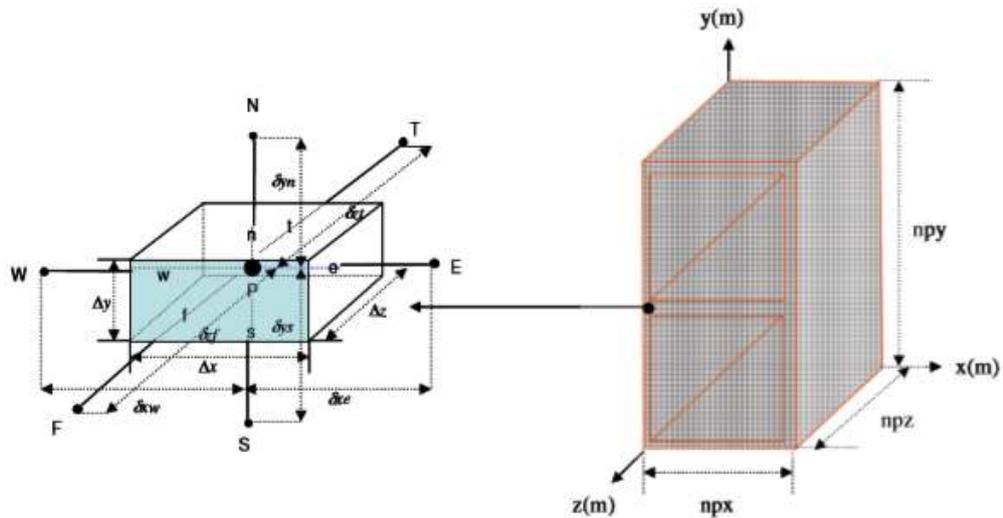
3.2.3.1 Malha numérica

Para se obter a malha utilizando o método dos volumes finitos, o tijolo, objeto de estudo do presente trabalho, foi decomposto em pequenos volumes de controles que são associados aos diversos pontos que constituem a malha.

Um fator essencial para se obter resultados satisfatórios nas simulações computacionais é o tipo de malha escolhido para avaliar o problema proposto. Para simular o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados foi utilizada uma malha cartesiana regular, devido a sua geometria simples, simplicidade na realização dos balanços e na solução dos sistemas lineares resultantes, conforme demonstrado em outros trabalhos como Nascimento (2002), Cadé et al. (2005), Avelino e Lima (2006) e Silva (2009).

A Figura 30 mostra não só a malha numérica utilizada, bem como a representação de um volume de controle e seus parâmetros geométricos característicos, situado em um determinado ponto nodal (nó) P.

Figura 30 – Malha numérica utilizada para simulação.



Fonte: Silva (2009)

Diante da malha numérica definida, as posições dos pontos nodais no interior do domínio foram obtidas por:

$$x_i = y_j = z_k = 0 \text{ para } i = j = k = 1 \quad (29)$$

$$x_i = \Delta x / 2, \text{ para } i = 2; \quad x_i = x_{i-1} + \Delta x, \text{ para } i = 3, \dots, np_x - 1; \quad x_i = R_1, \text{ para } i = np_x \quad (30)$$

$$y_j = \Delta y / 2, \text{ para } j = 2; \quad y_j = y_{j-1} + \Delta y, \text{ para } j = 3, \dots, \text{ npy} - 1; \quad y_j = R_2, \text{ para } j = \text{ npy} \quad (31)$$

$$z_k = \Delta z / 2, \text{ para } k = 2; \quad z_k = z_{k-1} + \Delta z, \text{ para } k = 3, \dots, \text{ npz} - 1; \quad z_k = R_3, \text{ para } k = \text{ npz} \quad (32)$$

3.2.3.2 Discretização da equação de difusão

A discretização foi feita integrando, no volume e no tempo para cada volume de controle do domínio, todos os termos da equação que governa o fenômeno, tendo como objetivo transformar uma equação diferencial parcial em uma equação algébrica de solução muito mais simples. O resultado é a equação discretizada contendo os valores de grandeza de interesse para um grupo de pontos da malha. A solução resultante implica que a conservação das quantidades de interesse é satisfeita em qualquer volume de controle e, conseqüentemente do domínio em estudo (PATANKAR, 1980; VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995; MALISKA, 2004 apud SILVA, 2009).

Dessa forma, aplicando-se a integral em todos os termos da Equação 18 no volume de controle tridimensional da Figura 30 e no tempo, e levando em consideração que não existem geração de calor e massa no interior do corpo, tem-se:

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial t} (\zeta \Phi) dv dt = \int_{v,t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dv dt + \int_{v,t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) dv dt + \int_{v,t} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dv dt \quad (33)$$

Como o problema físico proposto têm-se apenas efeitos difusivos, é mais simples utilizar uma função linear como função de interpolação espacial entre os pontos nodais. Dessa forma, as derivadas diretas relativas ao fluxo difusivo, referentes à Figura 30, são dadas por:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e = \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\delta x_e} \quad (34)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w = \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\delta x_w} \quad (35)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n = \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\delta y_n} \quad (36)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s = \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\delta y_s} \quad (37)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f = \frac{\Phi_F - \Phi_P}{\delta z_f} \quad (38)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_t = \frac{\Phi_P - \Phi_T}{\delta z_t} \quad (39)$$

Realizando-se a integração da Equação 33, termo a termo, e usando suas derivadas aproximadas, obtém-se:

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial t} (\zeta\Phi) dvdt = \int_{xw}^{xe} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\zeta\Phi) dt dx dy dz = \int_{xw}^{xe} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} [(\zeta\Phi)^{t+\Delta t} - (\zeta\Phi)^t] dx dy dz =$$

$$[(\zeta\Phi)^{t+\Delta t} - (\zeta\Phi)^t] \Delta x \Delta y \Delta z = [(\zeta_p \Phi_p) - (\zeta_p^o \Phi_p^o)] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (40)$$

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dvdt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \int_{xw}^{xe} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dx dt dy dz = \int_t^{t+\Delta t} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \Big|_w^e dt dy dz =$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \right) dt dy dz = \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta t \Delta y \Delta z =$$

$$f \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E - \Phi_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P - \Phi_W)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E^o - \Phi_P^o)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P^o - \Phi_W^o)}{(\delta x)_w} \right] \Delta t \Delta y \Delta z \quad (41)$$

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) dvdt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{zt}^{zf} \int_{ys}^{yn} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) dy dt dx dz = \int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{zt}^{zf} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) \Big|_s^n dt dx dz =$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{zt}^{zf} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \right) dt dx dz = \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta t \Delta x \Delta z =$$

$$f \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_S)}{(\delta y)_s} \right] + (1-f) \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N^o - \Phi_P^o)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P^o - \Phi_S^o)}{(\delta y)_s} \right] \Delta t \Delta x \Delta z \quad (42)$$

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dvdt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dz dt dx dy = \int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{ys}^{yn} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_t^f dt dx dy =$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{ys}^{yn} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_t \right) dt dx dy = \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_t \right) \Delta t \Delta x \Delta y =$$

$$f \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_T)}{(\delta z)_t} \right] + (1-f) \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F^o - \Phi_P^o)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P^o - \Phi_T^o)}{(\delta z)_t} \right] \Delta t \Delta x \Delta y \quad (43)$$

Todos os valores de Φ são avaliados como uma função linear entre os instantes anterior e atual, sendo dessa forma parcialmente conhecidas. Estes valores são dados por: $\Phi_P = f\Phi_P + (1-f)\Phi_P^o$, onde f é um fator que caracteriza o esquema temporal e varia entre 0 e 1.

Usando uma formulação totalmente implícita devido ao fato desta ser incondicionalmente estável, todos os termos difusivos são avaliados no instante $t + \Delta t$, e portanto $f = 1$ (MALISKA, 2004). Com isso, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} [(\zeta_P \Phi_P) - (\zeta_P^o \Phi_P^o)] \Delta x \Delta y \Delta z = & \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E - \Phi_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P - \Phi_W)}{(\delta x)_w} \right] \Delta t \Delta y \Delta z + \\ & \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_S)}{(\delta y)_s} \right] \Delta t \Delta x \Delta z + \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_T)}{(\delta z)_t} \right] \Delta t \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (44)$$

ou ainda

$$\begin{aligned} \left[\frac{(\zeta_P \Phi_P) - (\zeta_P^o \Phi_P^o)}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = & \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E - \Phi_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P - \Phi_W)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta z + \\ & \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_S)}{(\delta y)_s} \right] \Delta x \Delta z + \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_T)}{(\delta z)_t} \right] \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (45)$$

Reorganizando os termos que são comuns, pode-se escrever a Equação 45 na forma algébrica linear discretizada aplicada ao ponto P, como segue:

$$A_P \Phi_P = A_E \Phi_E + A_W \Phi_W + A_N \Phi_N + A_S \Phi_S + A_F \Phi_F + A_T \Phi_T + B \quad (46)$$

onde:

$$\begin{aligned} A_E &= \Gamma_e^\Phi \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_e} & A_W &= \Gamma_w^\Phi \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w} & A_N &= \Gamma_n^\Phi \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_n} & A_S &= \Gamma_s^\Phi \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s} \\ A_F &= \Gamma_f^\Phi \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_f} & A_T &= \Gamma_t^\Phi \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_t} & A_P^o &= \zeta_P^o \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} & B &= A_P^o \Phi_P^o \\ A_P &= A_E + A_W + A_N + A_S + A_F + A_T + \zeta_P \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \end{aligned}$$

A Equação 46 possui importante significado físico. Os coeficientes A_E , A_W , A_N , A_S , A_F e A_T representam a condutância entre o ponto P e seus vizinhos. O termo A_P^o representa a influência do valor da variável Φ no tempo anterior, sobre o seu valor no tempo atual. Nesta equação, $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ é o volume do elemento infinitesimal considerado na Figura 30.

Além disso, a Equação 46 é aplicada em todos os pontos internos ao domínio computacional, exceto aos pontos de fronteira, onde as condições de contorno devem ser incorporadas na formulação. Neste caso, usam-se os volumes adjacentes à superfície do corpo, denominados de volumes de controle de fronteira e precede-se a integração da equação de conservação, tal qual descrito anteriormente, considerando-se as condições de contorno apresentado na seção 3.2.1.

Ao considerar a condição de contorno convectiva, a equação de difusão da variável Φ para os volumes de controle de fronteira, tendo em vista o sólido da Figura 30, são dadas por exemplo para:

- Superfície externa (Face direita)

$$\left[\frac{(\zeta_P \Phi_P) - (\zeta_P^0 \Phi_P^0)}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \left[\Phi_x'' - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P - \Phi_W)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta z + \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_S)}{(\delta y)_s} \right] \Delta x \Delta z + \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_T)}{(\delta z)_t} \right] \Delta x \Delta y \quad (47)$$

Como o sistema é tridimensional, os pontos de fronteira da face direita em análise não possuem vizinhos posteriores e conseqüentemente o termo A_E na Equação 47 não existirá nestes pontos nodais. O mesmo é substituído pelo fluxo da variável Φ na superfície do material, como mostrado na Equação 47 para a face direita. Para as demais faces externas, superior e frontal, o procedimento é o mesmo para obtenção das equações discretizadas, só que nesse caso os termos que desaparecem são A_N e A_F , respectivamente.

- Superfície interna (Face direita do furo)

$$\left[\frac{(\zeta_P \Phi_P) - (\zeta_P^0 \Phi_P^0)}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E - \Phi_P)}{(\delta x)_e} - \Phi_x'' \right] \Delta y \Delta z + \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_S)}{(\delta y)_s} \right] \Delta x \Delta z + \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_T)}{(\delta z)_t} \right] \Delta x \Delta y \quad (48)$$

Novamente os pontos de fronteira dessa face não possuem vizinhos, então o termo A_W não existirá nestes pontos nodais. O mesmo é substituído pelo fluxo da variável Φ na superfície do material, como mostrado na Equação 48. O procedimento é o mesmo para obtenção das equações discretizadas nas outras faces internas do furo do tijolo.

Ainda sob a condição de contorno convectiva, assume-se que o fluxo difusivo é igual ao fluxo convectivo na superfície do tijolo, então pode-se escrever:

a) Transferência de massa

Para transferência de massa tem-se a partir da Equação 21:

$$-D \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial x} = h_m [M(x, y, z, t) - M_e] \text{ em } t > 0 \quad (49)$$

Válido para:

$$\text{Face A: } x = \frac{a_4}{2}, \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3\right) \leq y \leq \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3 + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face J: } x = R_1, 0 \leq y \leq R_2, 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face E: } x = \frac{a_4}{2}, \left(\frac{a_3}{2}\right) \leq y \leq \left(\frac{a_3}{2} + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$-D \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial x} = h_m [M(x, y, z, t) - M_w] \text{ em } t > 0 \quad (50)$$

Válido para:

$$\text{Face C: } x = \frac{a_4}{2} + l_x, \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3\right) \leq y \leq \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3 + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face G: } x = \frac{a_4}{2} + l_x, \left(\frac{a_3}{2}\right) \leq y \leq \left(\frac{a_3}{2} + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$-D \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial y} = h_m [M(x, y, z, t) - M_n] \quad (51)$$

Válido para:

$$\text{Face D: } \left(\frac{a_4}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), y = \frac{a_3}{2} + l_y + a_3, 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face H: } \left(\frac{a_4}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), y = \frac{a_3}{2}, 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face I: } 0 \leq x \leq R_1, y = R_2, 0 \leq z \leq R_3$$

$$-D \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial y} = h_m [M(x, y, z, t) - M_s] \quad (52)$$

Válido para:

$$\text{Face B: } \left(\frac{a_4}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), y = \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3 + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face F: } \left(\frac{a_4}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), y = \frac{a_3}{2} + l_y, 0 \leq z \leq R_3$$

$$-D \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial z} = h_m [M(x, y, z, t) - M_f] \quad (53)$$

Válido para:

$$\text{Face K: } 0 \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2}\right), 0 \leq y \leq R_2, z = R_3$$

$$\text{Face L: } \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right) \leq x \leq (R_1), 0 \leq y \leq R_2, z = R_3$$

$$\text{Face M: } \left(\frac{a_4}{2}\right) < x < \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), 0 \leq y \leq \frac{a_3}{2}, z = R_3$$

$$\text{Face N: } \left(\frac{a_4}{2}\right) < x < \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), \left(\frac{a_3}{2} + l_y \leq y \leq \frac{a_3}{2} + l_y + a_3\right), z = R_3$$

$$\text{Face O: } \left(\frac{a_4}{2}\right) < x < \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3 + l_y \leq y \leq R_2\right), z = R_3$$

b) Transferência de calor

Para transferência de calor tem-se a partir da Equação 21:

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = h_c [\theta(x, y, z, t) - \theta_e] \text{ em } t > 0 \quad (54)$$

Válido para:

$$\text{Face A: } x = \frac{a_4}{2}, \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3\right) \leq y \leq \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3 + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face J: } x = R_1, 0 \leq y \leq R_2, 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face E: } x = \frac{a_4}{2}, \left(\frac{a_3}{2}\right) \leq y \leq \left(\frac{a_3}{2} + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = h_c [\theta(x, y, z, t) - \theta_w] \text{ em } t > 0 \quad (55)$$

Válido para:

$$\text{Face C: } x = \frac{a_4}{2} + l_x, \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3\right) \leq y \leq \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3 + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face G: } x = \frac{a_4}{2} + l_x, \left(\frac{a_3}{2}\right) \leq y \leq \left(\frac{a_3}{2} + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} = h_c [\theta(x, y, z, t) - \theta_n] \text{ em } t > 0 \quad (56)$$

Válido para:

$$\text{Face D: } \left(\frac{a_4}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), y = \frac{a_3}{2} + l_y + a_3, 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face H: } \left(\frac{a_4}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), y = \frac{a_3}{2}, 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face I: } 0 \leq x \leq R_1, y = R_2, 0 \leq z \leq R_3$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} = h_c [\theta(x, y, z, t) - \theta_s] \text{ em } t > 0 \quad (57)$$

Válido para:

$$\text{Face B: } \left(\frac{a_4}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), y = \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3 + l_y\right), 0 \leq z \leq R_3$$

$$\text{Face F: } \left(\frac{a_4}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), y = \frac{a_3}{2} + l_y, 0 \leq z \leq R_3$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} = h_c [\theta(x, y, z, t) - \theta_f] \text{ em } t > 0 \quad (58)$$

Válido para:

$$\text{Face K: } 0 \leq x \leq \left(\frac{a_4}{2}\right), 0 \leq y \leq R_2, z = R_3$$

$$\text{Face L: } \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right) \leq x \leq (R_1), 0 \leq y \leq R_2, z = R_3$$

$$\text{Face M: } \left(\frac{a_4}{2}\right) < x < \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), 0 \leq y \leq \frac{a_3}{2}, z = R_3$$

$$\text{Face N: } \left(\frac{a_4}{2}\right) < x < \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), \left(\frac{a_3}{2} + l_y \leq y \leq \frac{a_3}{2} + l_y + a_3\right), z = R_3$$

$$\text{Face O: } \left(\frac{a_4}{2}\right) < x < \left(\frac{a_4}{2} + l_x\right), \left(\frac{a_3}{2} + l_y + a_3 + l_y \leq y \leq R_2\right), z = R_3$$

Com isto, considerando a face J como referência, pode-se encontrar o fluxo Φ_x'' da seguinte forma:

$$\Phi_x'' = h[\Phi(x, y, z, t) - \Phi_e] = -\Gamma_e \Phi \left(\frac{\Phi(x, y, z, t) - \Phi_p}{(\delta x)_e} \right) \quad (59)$$

I

II

III

Igualando os termos I e II, isolando-se Φ , e substituindo na Equação III, tem-se:

$$\Phi_x'' = \frac{\Phi_P - \Phi_e}{\left(\frac{1}{h} + \frac{(\delta x)_e}{\Gamma_e^\Phi}\right)} \quad (60)$$

Para transferência de massa, pode-se escrever:

$$M_x'' = \frac{M_P - M_e}{\left(\frac{1}{h_m} + \frac{(\delta x)_e}{D_e}\right)} \quad (61)$$

Já para transferência de calor, pode-se escrever:

$$\theta_x'' = \frac{\theta_P - \theta_e}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{(\delta x)_e}{k_e}\right)} \quad (62)$$

Dessa forma, como exemplo, substituindo a Equação 62 na Equação 47 aplicada a face direita da superfície externa do sólido e rearranjando os termos, tem-se a equação de difusão, na sua forma discretizada. Procedendo-se igual para as demais faces, pode-se escrever os termos da seguinte forma:

a) Nas superfícies externas do tijolo:

$$A_E = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira da face direita (Face J)} \\ \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{(\delta x)_e} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (63)$$

$$A_N = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira da face superior (Face I)} \\ \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{(\delta y)_n} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (64)$$

$$A_F = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira das faces frontais (Face K, L, M, N e O)} \\ \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{(\delta z)_f} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (65)$$

Definindo a quantidade \overline{SM} como o termo fonte associado aos termos convectivos nas superfícies do sólido e que é adicionado aos pontos nodais que precedem as fronteiras externa e interna do mesmo, tem-se:

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os demais pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta y \Delta z}{\frac{1}{h_x} + \frac{(\delta x)_e}{\Gamma_e^\Phi}} \right) & \text{para os pontos de fronteira da face direita (Face J)} \end{cases} \quad (66)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os demais pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_y} + \frac{(\delta y)_n}{\Gamma_n^\Phi}} \right) & \text{para os pontos de fronteira da face superior (Face I)} \end{cases} \quad (67)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os demais pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta x \Delta y}{\frac{1}{h_z} + \frac{(\delta z)_f}{\Gamma_f^\Phi}} \right) & \text{para os pontos de fronteira das faces frontais (Face K, L, M, N e O)} \end{cases} \quad (68)$$

b) Nas superfícies internas do tijolo:

$$A_E = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira das faces esquerdas (Face A e E)} \\ \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{(\delta x)_e} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (69)$$

$$A_W = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira das faces direitas (Face C e G)} \\ \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{(\delta x)_w} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (70)$$

$$A_N = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira das faces inferiores (Face D e H)} \\ \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{(\delta y)_n} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (71)$$

$$A_S = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira das faces superiores (Face B e F)} \\ \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{(\delta y)_s} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (72)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os demais pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta y \Delta z}{\frac{1}{h_x} + \frac{(\delta x)_e}{\Gamma_e^\Phi}} \right) & \text{para os pontos de fronteira das faces esquerda (Face A e E)} \end{cases} \quad (73)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os demais pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta y \Delta z}{\frac{1}{h_x} + \frac{(\delta x)_w}{\Gamma_w^\Phi}} \right) & \text{para os pontos de fronteira das faces direitas (Face C e G)} \end{cases} \quad (74)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os demais pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_y} + \frac{(\delta y)_n}{\Gamma_n^\Phi}} \right) & \text{para os pontos de fronteira das faces inferiores (Face D e H)} \end{cases} \quad (75)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os demais pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_y} + \frac{(\delta y)_s}{\Gamma_s^\Phi}} \right) & \text{para os pontos de fronteira da face superior (Face B e F)} \end{cases} \quad (76)$$

$$A_P = \sum A_b + \zeta_p \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \overline{SM} \quad (77)$$

É importante conhecer também o teor de umidade e temperatura média do sólido em qualquer instante do processo. Estas grandezas são obtidas a partir da seguinte equação, considerando Φ a variável de interesse:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{V} \int_V \Phi dV \quad (78)$$

onde V é o volume do sólido em estudo.

Já os valores adimensionais da umidade e temperatura são dados pelas seguintes expressões:

$$M^* = (M - M_{eq}) / (M_o - M_{eq}) \quad (79)$$

$$\theta^* = (\theta_{eq} - \theta) / (\theta_{eq} - \theta_o) \quad (80)$$

3.2.3.3 Software computacional

Para resolver o sistema de equações gerado pela Equação 18, um programa computacional, desenvolvido por Nascimento (2002) utilizando o software Mathematica®, foi adaptado para este trabalho. Nele, o sistema de equações lineares é resolvido iterativamente usando o método de Gauss-Seidel.

Assumiu-se que a solução numérica convergiu quando, partindo de uma condição inicial, o seguinte critério foi satisfeito, em cada ponto do domínio computacional, num certo instante de tempo:

$$|\Phi^{n+1} - \Phi^n| \leq 10^{-8} \quad (81)$$

Além disso, os pontos de simetria não entram no conjunto de equações a serem resolvidos. Após a resolução do sistema de equações, a estimativa para esses pontos é feita. Dessa forma, assume-se que o fluxo de Φ (massa ou calor) que sai do ponto adjacente ao ponto de simetria é igual ao fluxo de Φ que chega no ponto de simetria avaliado, e pode-se escrever:

a) Para os pontos situados no plano ($x = 0, 0 \leq y \leq R_2, 0 \leq z \leq R_3$)

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w = -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e \quad (82)$$

Na forma discretizada, tem-se:

$$-\frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P - \Phi_w)}{(\delta x)_w} = -\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E - \Phi_P)}{(\delta x)_e} \quad (83)$$

Isolando Φ_w , encontra-se:

$$\Phi_w = \left(\frac{\Gamma_e^\Phi (\delta x)_w}{\Gamma_w^\Phi (\delta x)_e} + 1 \right) \Phi_P - \frac{\Gamma_e^\Phi (\delta x)_w}{\Gamma_w^\Phi (\delta x)_e} \Phi_E \quad (84)$$

b) Para os pontos situados no plano ($0 \leq x \leq R_1, y = 0, 0 \leq z \leq R_3$)

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s = -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n \quad (85)$$

Na forma discretizada, tem-se:

$$-\frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_s)}{(\delta y)_s} = -\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} \quad (86)$$

Isolando Φ_s , encontra-se:

$$\Phi_s = \left(\frac{\Gamma_n^\Phi (\delta y)_s}{\Gamma_s^\Phi (\delta y)_n} + 1 \right) \Phi_P - \frac{\Gamma_n^\Phi (\delta y)_s}{\Gamma_s^\Phi (\delta y)_n} \Phi_N \quad (87)$$

c) Para os pontos situados no plano ($0 \leq x \leq R_1, 0 \leq y \leq R_2, z = 0$)

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_t = -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f \quad (88)$$

Na forma discretizada, tem-se:

$$-\frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_t)}{(\delta z)_t} = -\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} \quad (89)$$

Isolando Φ_t , encontra-se:

$$\Phi_t = \left(\frac{\Gamma_f^\Phi (\delta z)_t}{\Gamma_t^\Phi (\delta z)_f} + 1 \right) \Phi_P - \frac{\Gamma_f^\Phi (\delta z)_t}{\Gamma_t^\Phi (\delta z)_f} \Phi_F \quad (90)$$

Outro ponto importante em relação à programação computacional, refere-se aos pontos situados na superfície do material. Para esses pontos, após a discretização da equação da condição de contorno na superfície, o valor da variável de interesse pode ser calculado por:

a) Nas superfícies externas, tem-se:

$$\Phi_e = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta x)_e}{\Gamma_e^\Phi}} \quad (91)$$

$$\Phi_n = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta y)_n}{\Gamma_n^\Phi}} \quad (92)$$

$$\Phi_f = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta z)_f}{\Gamma_f^\Phi}} \quad (93)$$

b) Nas superfícies internas, tem-se:

$$\Phi_e = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta x)_e}{\Gamma_e^\Phi}} \quad (94)$$

$$\Phi_w = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta x)_w}{\Gamma_w^\Phi}} \quad (95)$$

$$\Phi_n = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta y)_n}{\Gamma_n^\Phi}} \quad (96)$$

$$\Phi_s = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta y)_s}{\Gamma_s^\Phi}} \quad (97)$$

Estas equações também não entram no sistema de equações a ser resolvido, servindo apenas para determinar o valor de Φ na superfície do sólido em estudo, uma vez conhecido o seu valor nos pontos de fronteira. Tais equações foram introduzidas para calor e massa, fazendo nas variáveis as devidas alterações que neste trabalho foram citadas anteriormente.

Com todas as equações resolvidas pelo software e as devidas estimativas das variáveis nos pontos preestabelecidos, conforme mencionado anteriormente, pode-se fazer uma análise detalhada do processo de secagem do tijolo cerâmico vazado através dos diversos resultados obtidos que serão apresentados no próximo capítulo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os dados utilizados inicialmente nas simulações considerando as temperaturas do ar de secagem em 50° C e 100° C. Esses dados apresentam tanto parâmetros geométricos, quanto propriedades termofísicas do tijolo cerâmico, obtidos do trabalho experimental e numérico realizado por Silva (2009). Tais dados, desde que bem definidos, traduz de forma precisa o fenômeno de secagem, e por consequência pode-se obter uma condição ótima para realização do processo.

Tabela 2 – Parâmetros geométricos e propriedades termofísicas usadas inicialmente nas simulações para as temperaturas de 50° C e 100° C.

Parâmetros	Unidade	Temperatura de Secagem, T	
		50° C	100° C
$R_1 / R_2 / R_3$	mm	46,68 / 98,5 / 100	
$a_1 / a_2 / a_3 / a_4$	mm	9,04 / 7,10 / 7,88 / 6,30	
E	MPa	70,0	
ν	-	0,35	
α_M	[kg _{MS} /kg _{H₂O}]	3,3 x 10 ⁻²	
α_θ	[°C ⁻¹]	6,0 x 10 ⁻⁶	
D	[m ² /s]	4 x 10 ⁻¹⁰	1,6 x 10 ⁻⁹
h_m	[m/s]	2 x 10 ³⁰	1 x 10 ³⁰
$\alpha = k/\rho c_p$	[m ² /s]	3,96 x 10 ⁻⁷	4,6 x 10 ⁻⁷
h_c	[W/m ² .K]	1,91	2,68
θ_o	° C	20,6	42
θ_{eq}	° C	50	100
M_o	[kg _{H₂O} /kg _{MS}]	0,13969	0,169036
M_{eq}	[kg _{H₂O} /kg _{MS}]	0,00011	0,000384

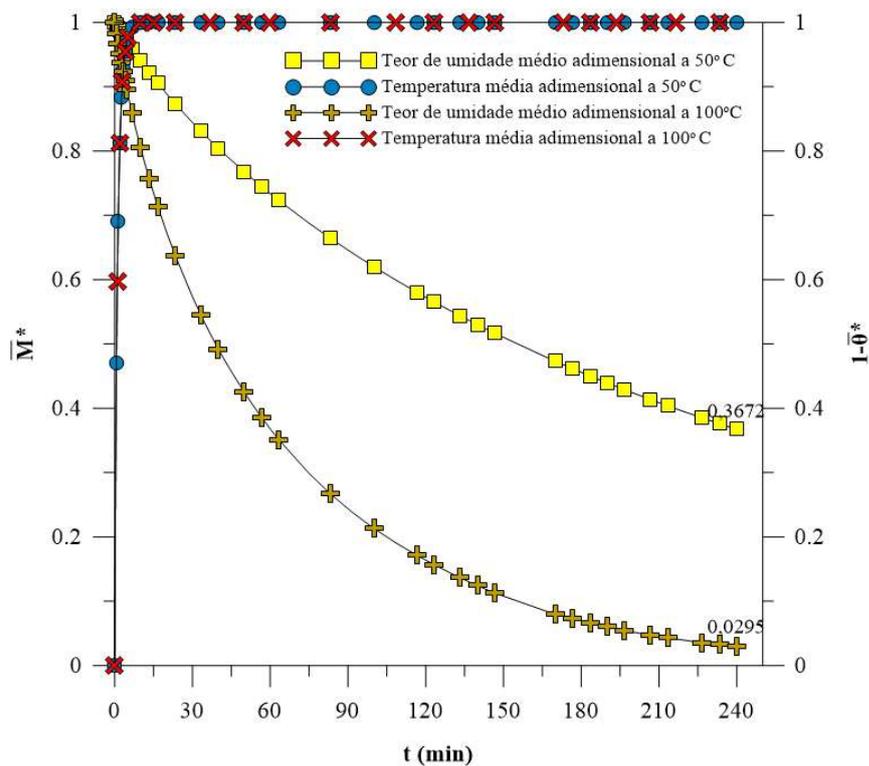
Fonte: Silva (2009)

A Figura 31 apresenta as cinéticas de secagem e aquecimento para as temperaturas de secagem de 50° C e 100° C com base nos dados da Tabela 2. Considerando a análise do teor de umidade médio adimensional \bar{M}^* , verifica-se que ao final de 240 min (4 hrs) de processo, enquanto o tijolo está praticamente seco a 100° C, cerca de 36% de umidade ainda está presente na condição de secagem a 50° C. Além disso, é possível observar que com uma temperatura

elevada do ar, o decréscimo de umidade na primeira hora é alto, o que pode ocasionar gradientes de umidade no interior do tijolo.

No caso da temperatura média adimensional do tijolo $\bar{\theta}^*$, observa-se que para os dois casos em análise, o aquecimento ocorre de forma muito rápida, ocasionando o equilíbrio térmico em menos 15 min de processo. Outro ponto importante, a ser observado no aumento da referida temperatura do sólido, é que praticamente não houve diferença nesses valores durante a secagem a 50° C e 100° C. Essas duas análises verificadas para a temperatura média adimensional do tijolo, evidenciam incoerência nos valores das propriedades térmicas utilizadas na Tabela 2, quando utilizado no modelo de difusão líquida, haja vista que na prática o comportamento de aquecimento do tijolo se caracteriza de outra forma, mais lento e com diferenças para cada temperatura do ar de secagem utilizada.

Figura 31 – Cinéticas de secagem e aquecimento para as temperaturas de 50° C e 100° C.

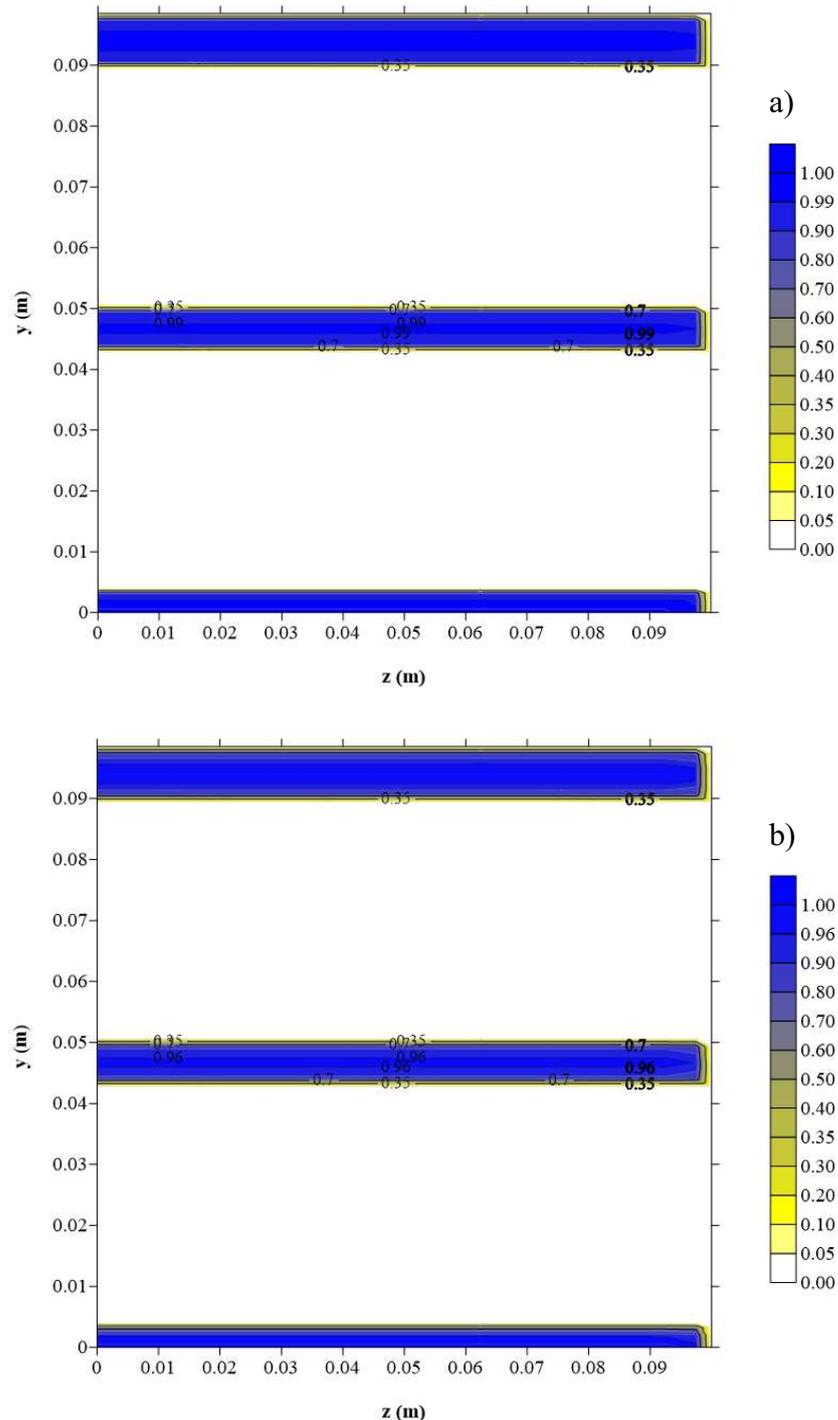


Fonte: Autoria própria (2018)

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional M^* no interior do tijolo nos planos $x = 24 \text{ mm} (\cong R_1 / 2)$ em 5 min de tempo de secagem e $z = 50 \text{ mm} (\cong R_3 / 2)$ em 120 min, respectivamente, considerando as temperaturas de 50° C e 100° C. Primeiramente é possível observar que praticamente não há diferença nos campos de umidade do tijolo no início do processo, apesar das diferentes temperaturas utilizadas, concordando com

os resultados apresentado por Nascimento (2002), Cadê et al. (2005), Lucena (2005) e Avelino e Lima (2006). Essa pouca diferença, pode ser observada pelos valores de 0,99 e 0,96 das linhas de teor de umidade adimensional mostradas no centro do tijolo, respectivamente pela Figura 32a e Figura 32b.

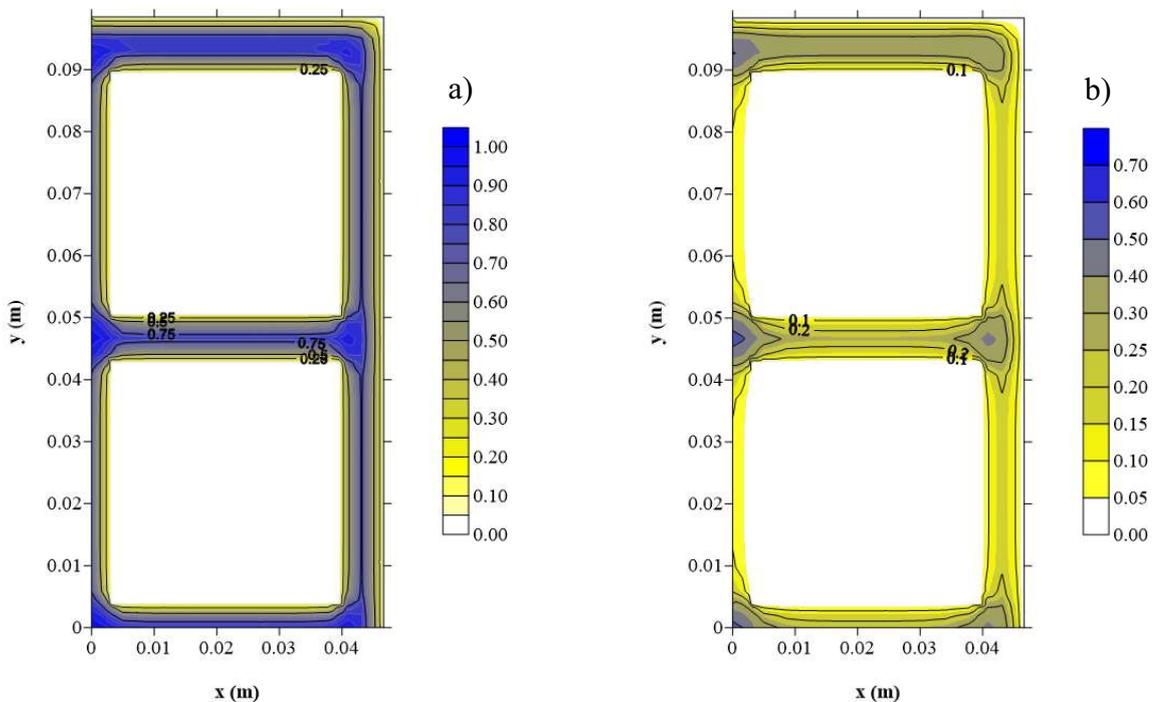
Figura 32 – Distribuição do teor de umidade adimensional M^* no plano $x = 24 \text{ mm} (\cong R_1 / 2)$ em 5 min de secagem para as temperaturas de: a) 50°C e b) 100°C .



Fonte: Autoria própria (2018)

Por outro lado, verifica-se que as regiões das superfícies externas e internas já apresentam um teor de umidade bastante baixo, em função da alta intensidade da convecção do ar ao qual o tijolo está exposto e consequente elevada evaporação na sua superfície. Esse alto valor para o h_m , pressupõe uma condição quase que instantânea de evaporação da água na superfície do material. Já para um maior tempo de processo e temperaturas mais altas, é possível observar gradientes de umidade mais acentuados, principalmente entre as regiões centrais e dos vértices, como pode ser observado pelas linhas que representam 0,2 de teor de umidade e regiões com valores que vão de 0,4 a 0,7, apresentados na Figura 33b.

Figura 33 – Distribuição do teor de umidade adimensional M^* no plano $z = 50 \text{ mm}$ ($\cong R_3 / 2$) em 120 min de secagem para as temperaturas de: a) 50°C e b) 100°C .

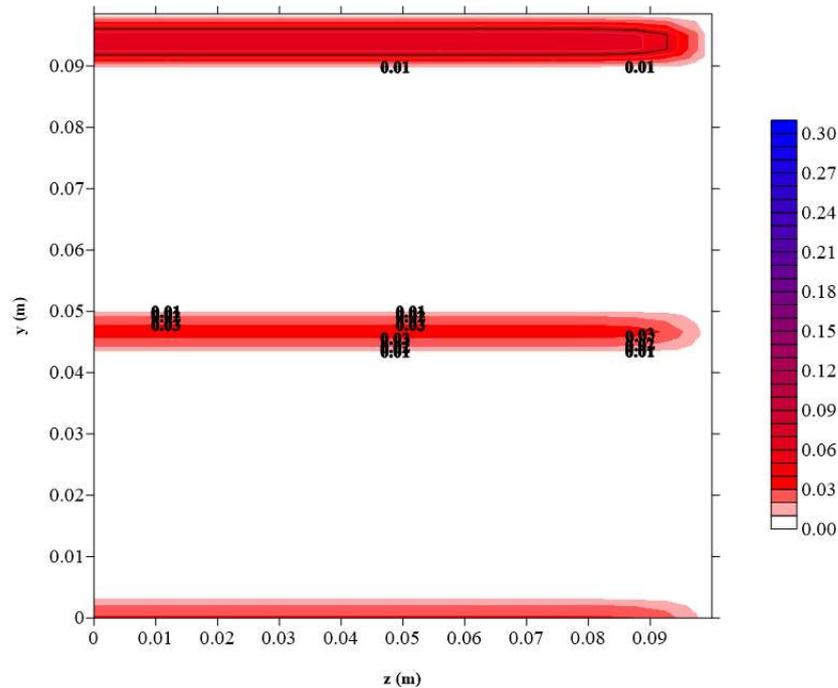


Fonte: **Autoria própria (2018)**

Em relação a temperatura adimensional do tijolo θ^* , somente a Figura 34 é apresentada, pois através dela já é possível verificar que com 5 min de processo, praticamente todo o tijolo está aquecido e em equilíbrio com a temperatura do meio de secagem, apenas uma pequena parte central do mesmo não se encontra com a temperatura alta. Essa elevação de temperatura do sólido tão rápida, já apresentada na cinética de aquecimento, fisicamente não é esperada e não concordam com outros trabalhos sobre secagem de materiais cerâmicos, como Nascimento (2002), Cadê et al. (2005), Lucena (2005), Avelino e Lima (2006) e Batista e Nascimento (2007), tendo em vista que a temperatura do tijolo aumenta gradualmente com o tempo,

principalmente quando se leva em conta temperaturas consideradas baixas para o processo de secagem, como é caso do valor de 50° C.

Figura 34 – Distribuição da temperatura adimensional θ^* no plano $x = 24 \text{ mm} (\cong R_1 / 2)$ em 5 min de secagem para a temperatura de 50° C.



Fonte: Autoria própria (2018)

Fazendo uma análise para a temperatura do tijolo conforme mostrado na Figura 31 e Figura 34, deve-se ter em mente quais fatores afetam a transferência de calor no modelo de difusão líquida, diante das considerações utilizadas. A grande crítica que se faz ao modelo de difusão líquida, reside no fato de que o mesmo não considera a evaporação e consequente difusão de vapor ocorrida no interior do sólido, o que em termos práticos aumenta não só a transferência de calor, como a transferência massa no fenômeno, em função de maiores valores das propriedades envolvidas, principalmente os coeficientes de difusão de massa e calor. Dessa forma, pode-se afirmar que todo o calor que chega no processo de secagem do tijolo é utilizado para o aquecimento do sólido, aquecimento da água no seu interior e evaporação da água na sua superfície, sendo desconsiderada uma parcela de calor para vaporização ocorrida no interior do mesmo.

Para contornar esse problema alguns autores como Oliveira et al. (2006), Costa (2013) e Silva et al. (2015), definem e utilizam na teoria de difusão líquida o chamado coeficiente de difusão efetivo D_{ef} e α_{ef} . Segundo Oliveira et al. (2006), a difusividade efetiva engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre

obtido pelo ajuste de valores experimentais. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ela não é intrínseca ao material. Com base nos trabalhos citados anteriormente, os valores do coeficiente de difusão efetiva tanto para a difusão de massa como para difusão de calor, variam na ordem de 10^{-9} a 10^{-11} .

Dessa forma, a Tabela 3 apresenta os valores das propriedades termofísicas revisadas com o objetivo de evitar o aquecimento e taxa de evaporação excessivos apresentados nos resultados anteriores. Tal revisão foi estabelecida utilizando a mesma metodologia apresentada por Silva (2009), obtendo os menores desvios entre os valores experimentais e os calculados numericamente. Além disso, um valor intermediário de temperatura de secagem (70°C) foi incluído na Tabela 3, tendo em vista avaliar uma condição mais adequada para o processo.

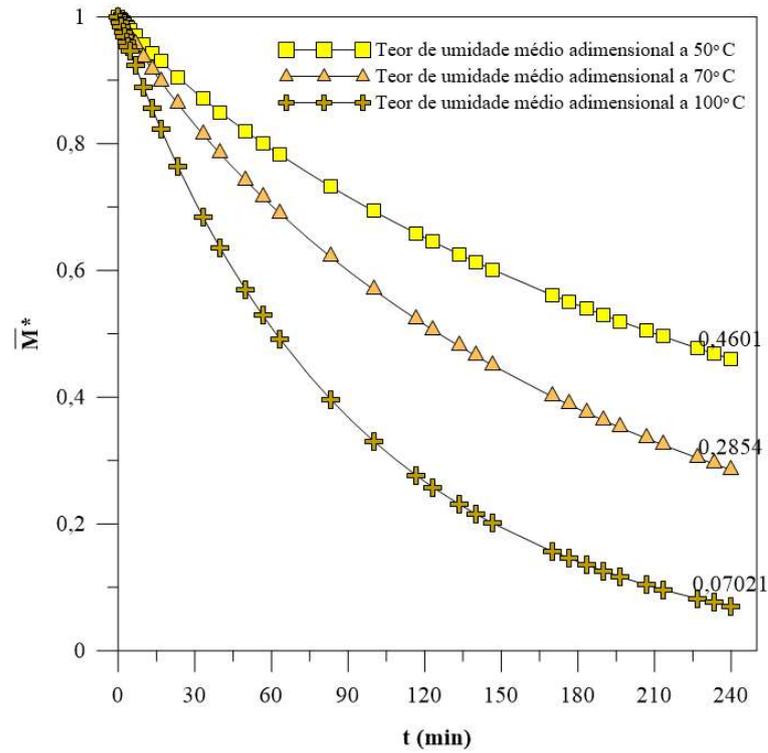
Tabela 3 – Propriedades termofísicas revisadas para as temperaturas de 50°C e 100°C e inclusão dos valores para 70°C .

Parâmetros	Unidade	Temperatura de Secagem, T		
		50°C	70°C	100°C
D_{ef}	$[\text{m}^2/\text{s}]$	$3,2 \times 10^{-10}$	8×10^{-10}	4×10^{-9}
h_m	$[\text{m}/\text{s}]$	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}
α_{ef}	$[\text{m}^2/\text{s}]$	$3,7 \times 10^{-10}$	$7,5 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-9}$
h_c	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$	Idem a Tabela 2	2,26	Idem a Tabela 2

Fonte: Autoria própria (2018)

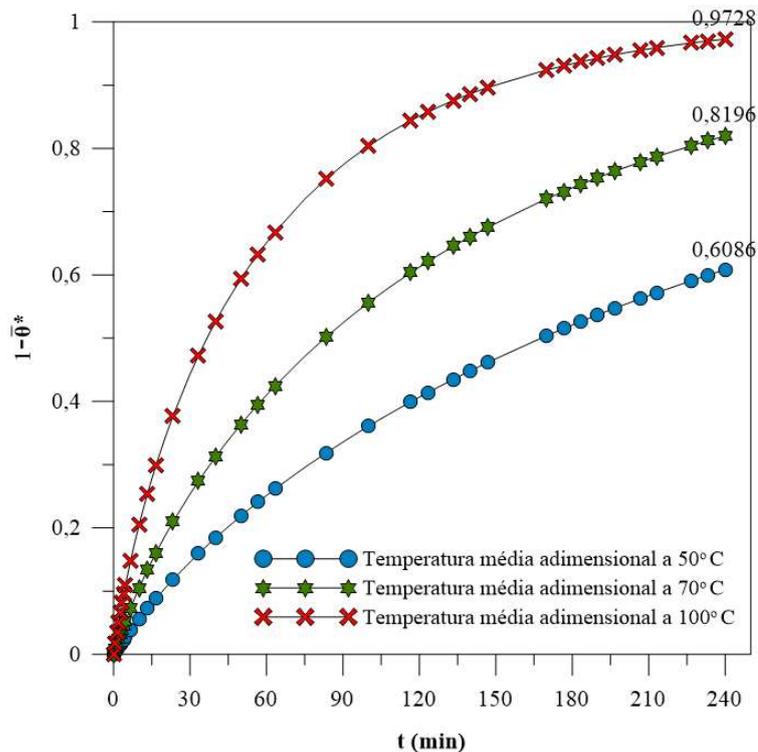
A Figura 35 e a Figura 36 apresentam as novas cinéticas de secagem e aquecimento, respectivamente, para as temperaturas de 50°C , 70°C e 100°C , considerando as simulações com os valores de propriedades conforme a Tabela 3. A partir desses gráficos é possível observar que tanto o valor da umidade como o valor da temperatura média no tijolo, variam gradativamente ao longo do processo e que a transferência de massa e calor ocorrem aproximadamente na mesma proporção, como pode ser visto após 240 min (4 hrs) de processo pelos valores de \bar{M}^* , dados aproximadamente por 0,46, 0,28 e 0,07, contra os valores de $(1 - \bar{\theta}^*)$ iguais a 0,61, 0,82 e 0,97, respectivamente para as temperaturas de secagem de 50, 70 e 100°C . Além disso, é importante verificar que quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais rápido o tijolo perde umidade e mais rápido sua temperatura aumenta, resultado fisicamente esperado e nessa disposição, em concordância com os experimentos apresentados por Silva (2009).

Figura 35 – Cinéticas de secagem para as temperaturas de 50° C, 70° C e 100° C com base nos valores da Tabela 3.



Fonte: Autoria própria (2018)

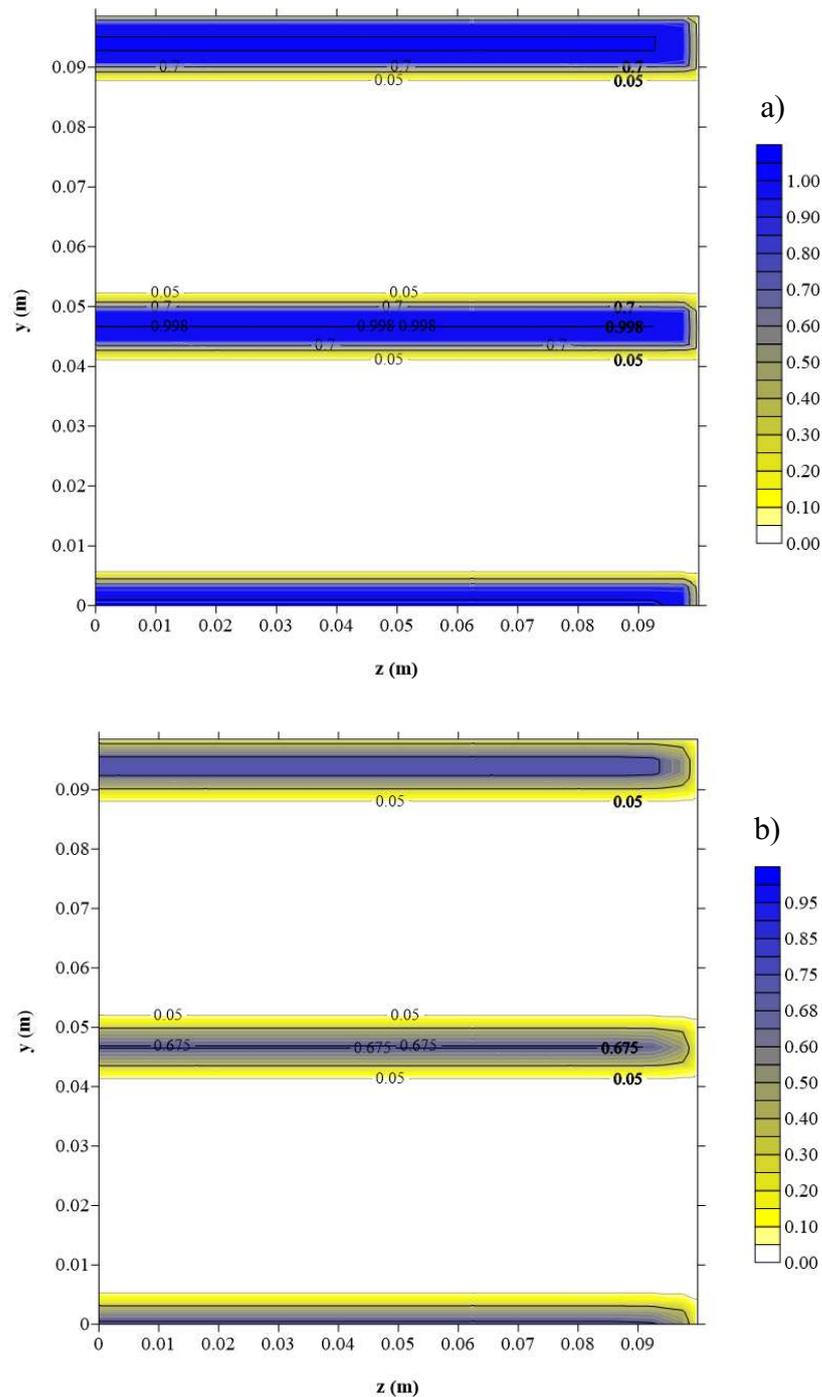
Figura 36 – Cinéticas de aquecimento para as temperaturas de 50° C, 70° C e 100° C com base nos valores da Tabela 3.



Fonte: Autoria própria (2018)

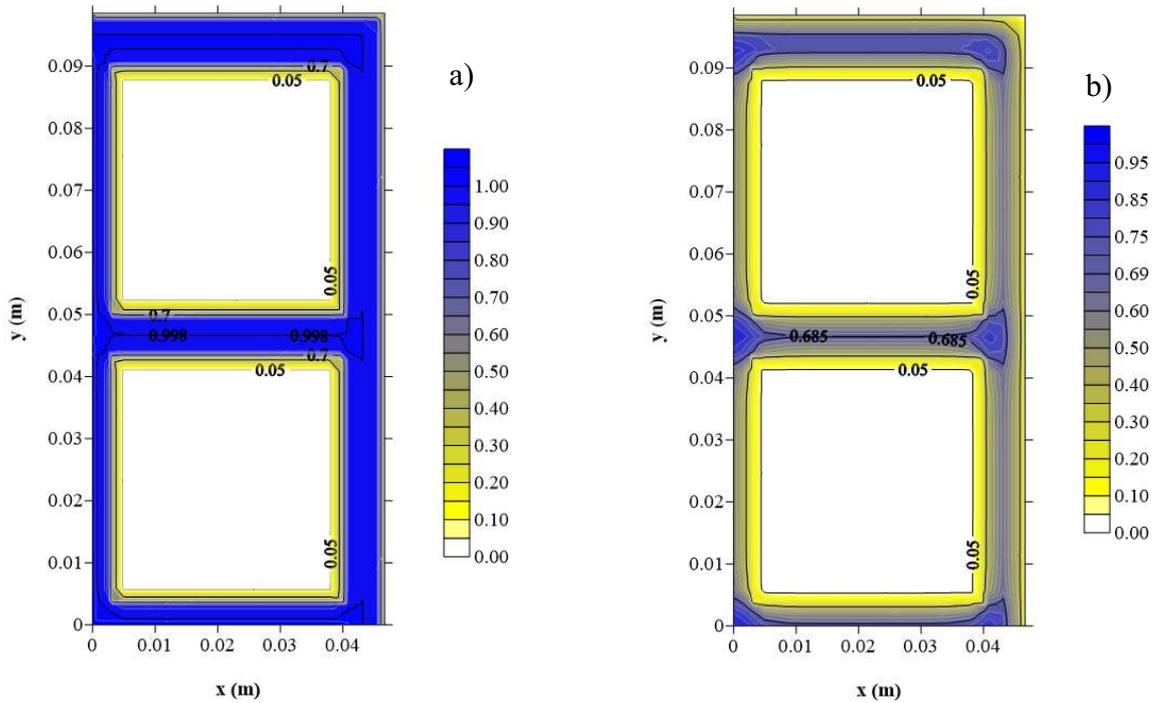
Considerando os valores da Tabela 3, a Figura 37 e a Figura 38 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional M^* no interior do tijolo nos planos $x = 24 \text{ mm}$ ($\cong R_1 / 2$) e $z = 50 \text{ mm}$ ($\cong R_3 / 2$), respectivamente, considerando uma temperatura de secagem de 70°C e nos tempos de 5 e 120 min. Enquanto as Figura 39 e a Figura 40 apresentam a distribuição da temperatura adimensional θ^* no interior do tijolo nos mesmos planos, tempos e temperatura.

Figura 37 – Distribuição do teor de umidade adimensional M^* no plano $x = 24 \text{ mm}$ ($\cong R_1 / 2$) nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70°C .



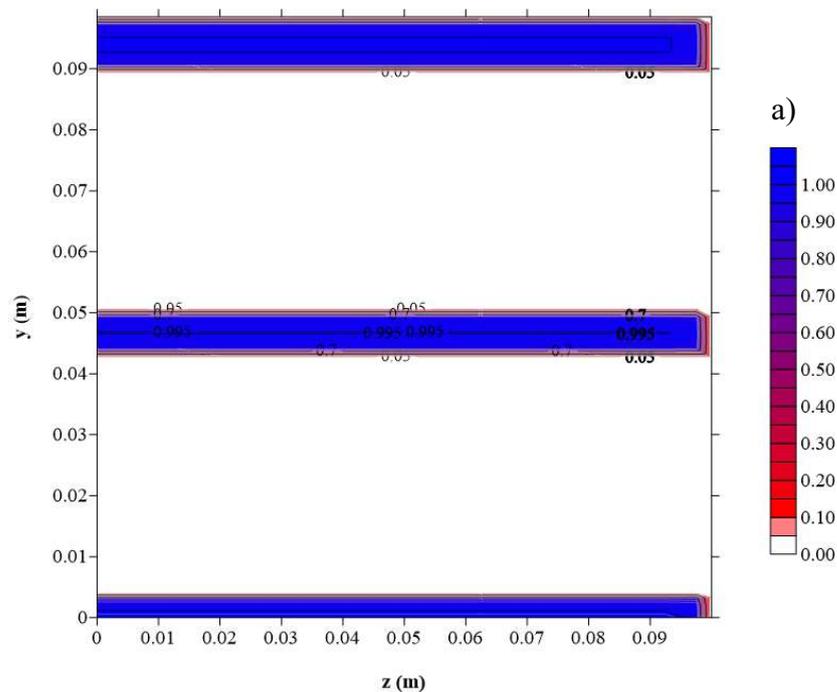
Fonte: Autoria própria (2018)

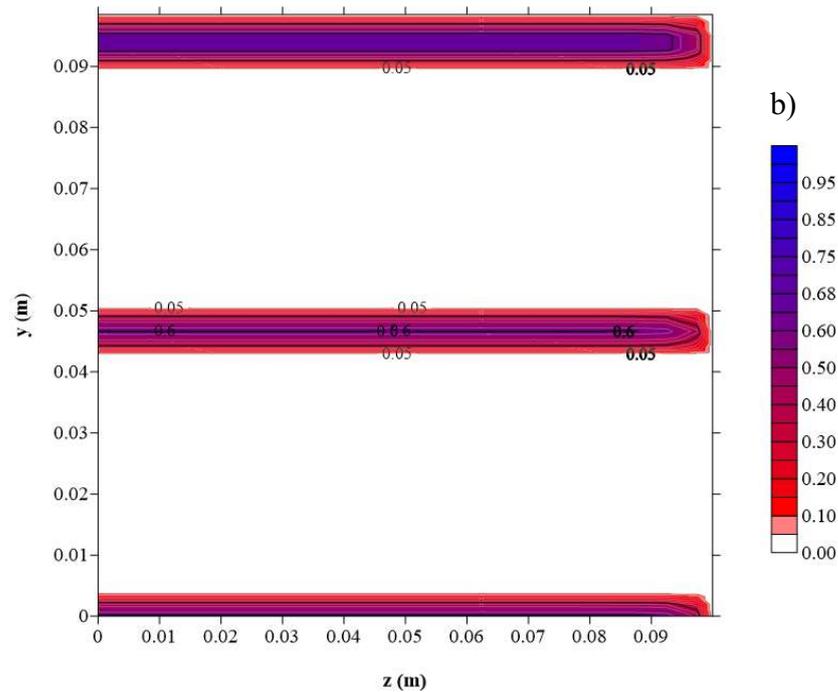
Figura 38 – Distribuição do teor de umidade adimensional M^* no plano $z = 50 \text{ mm}$ ($\cong R_3 / 2$) nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70° C .



Fonte: Autoria própria (2018)

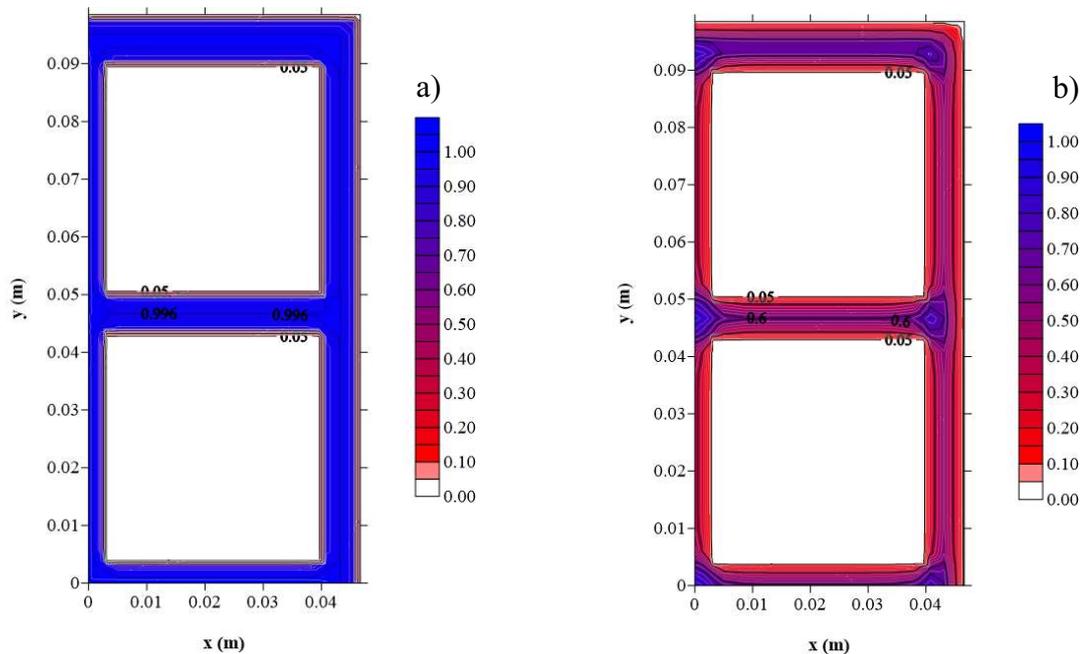
Figura 39 – Distribuição da temperatura adimensional θ^* no plano $x = 24 \text{ mm}$ ($\cong R_1 / 2$) nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70° C .





Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 40 – Distribuição da temperatura adimensional θ^* no plano $z = 50 \text{ mm}$ ($\cong R_3 / 2$) nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70°C .



Fonte: Autoria própria (2018)

Analisando as Figuras 37 a 40, verificou-se a existência de uma diferença não só do teor de umidade, como também da temperatura adimensional, entre as regiões centrais e as regiões das superfícies do tijolo. Observou-se ainda que os maiores gradientes de umidade e de temperatura estão localizados próximos aos vértices do tijolo, uma vez que estas regiões estão em contato

mais intenso com o ar de secagem, com isso as mesmas são mais susceptíveis ao aparecimento de trincas e deformações. Fisicamente, isto é esperado, pois, estando o sólido mais exposto a uma atmosfera envolvente, tende a variar mais rapidamente o valor de M^* e θ^* nessas regiões em todos os planos e em qualquer tempo, concordando com os resultados da literatura (KEEY, 1992; NASCIMENTO, 2002; CADÉ et al., 2005; LUCENA, 2005; AVELINO; LIMA, 2006).

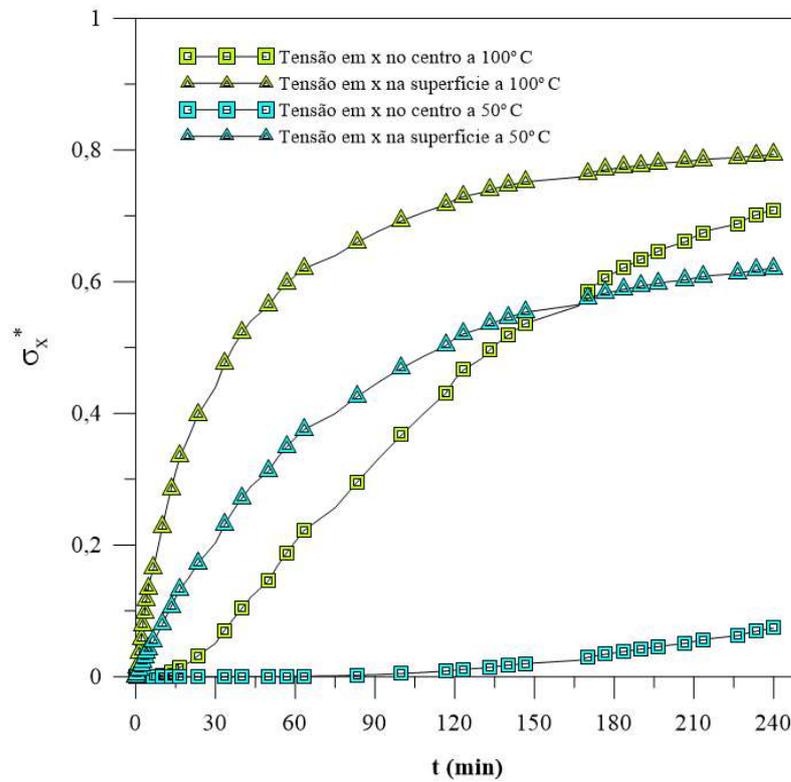
Com respeito à distribuição de umidade, percebe-se pela Figura 37 e Figura 38 que com a diminuição do h_m , a taxa de evaporação na superfície diminui consideravelmente, sendo possível notar uma maior faixa de valores M^* nessa região que vai até 0,05, melhorando portanto, a condição quase que instantânea de evaporação, mostrado nas Figura 32 e Figura 33.

Em relação as tensões termo-hídricas ocorridas no interior do tijolo, a Figura 41 apresenta as tensões internas adimensionais em x (σ_x^*), no centro e na superfície externa em função do tempo para as temperaturas de secagem de 50°C e 100°C . Considerando uma $\sigma_{adm} = 1,5\text{ Mpa}$, tensão mínima requerida em testes nos tijolos segundo a NBR 15270 (2005), observa-se uma diferença entre os valores de tensões no centro e na superfície em qualquer temperatura. Os maiores valores ocorrem na superfície, em função da maior perda de umidade e maior aquecimento ocorridos nessas regiões, concordando com o trabalho de Avelino e Lima (2007).

Outro ponto importante observado, consiste no fato de que as maiores diferenças de tensões ocorrem em temperaturas menores, para uma temperatura de secagem de 50°C , têm-se valores no centro e na superfície, respectivamente, próximos a 0,1 e 0,6 ao final de 240 min, enquanto para uma temperatura de 100°C esses valores estão em torno de 0,7 e 0,82. Porém, em contrapartida, mesmo em temperaturas baixas os valores das tensões internas no centro já alcançam valores maiores que $0,5\sigma_{adm}$ em apenas 4 hrs de processo, podendo-se inferir que em um tempo consideravelmente longo, tais tensões serão muito próximo ao permitido e com a possibilidade de produzir efeitos indesejáveis como trincas, principalmente nas superfícies.

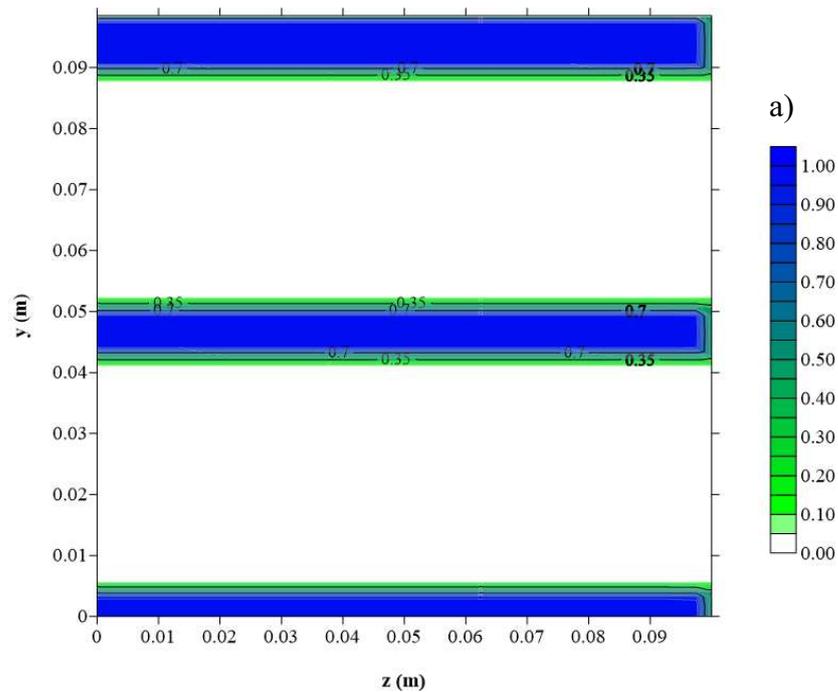
Ainda sob a ótica da Figura 41, observa-se que durante todo o processo de secagem tanto as tensões no centro quanto as tensões na superfície externa são predominantemente de tração para ambas as temperaturas, concordando com os resultados apresentados por Ahmad et al. (2012) e Vidal-Sallé et al. (2014). Esse efeito, bem como os outros anteriormente citados, podem ser explicados pela maior influência da perda de umidade no tijolo se comparado com o aumento da temperatura. Pela Tabela 2, enquanto o coeficiente de contração hídrica linear α_M é da ordem de 10^{-2} , o coeficiente de dilatação térmica linear α_θ é da ordem 10^{-6} , implicando uma predominância de contração durante toda a secagem e por reação tensões internas de tração, mesmo com a pequena diferença de umidade retirada entre um tempo e outro (ΔM) da ordem de 10^{-3} . Lembrando que os valores de σ_x^* , σ_y^* e σ_z^* são iguais conforme Equação 28.

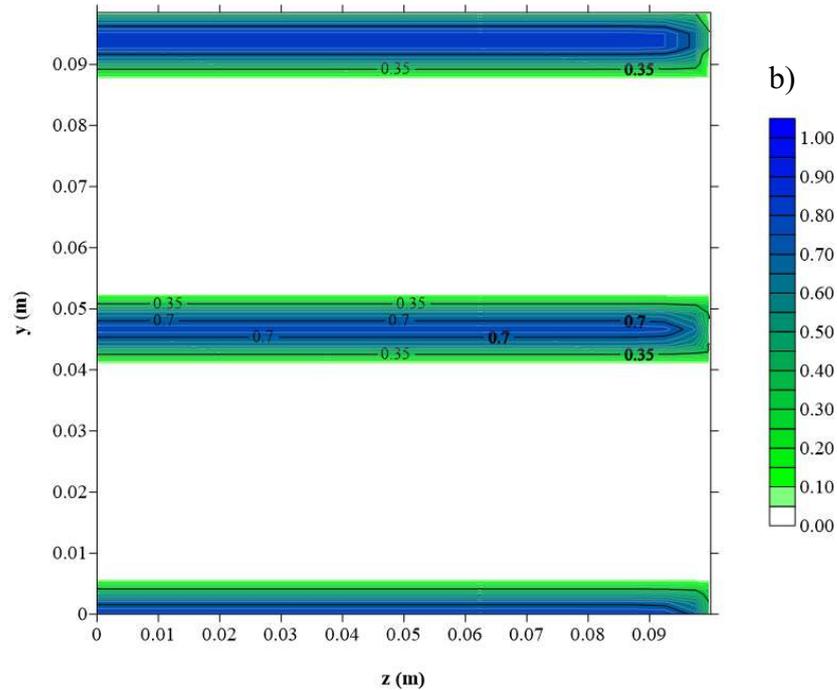
Figura 41 – Tensões internas adimensionais em x, $\sigma_x^* = (\sigma_x - \sigma_{\min}) / (\sigma_{\text{adm}} - \sigma_{\min})$, no centro e na superfície externa em função do tempo para as temperaturas de 50° C e 100° C.



Fonte: Autoria própria (2018)

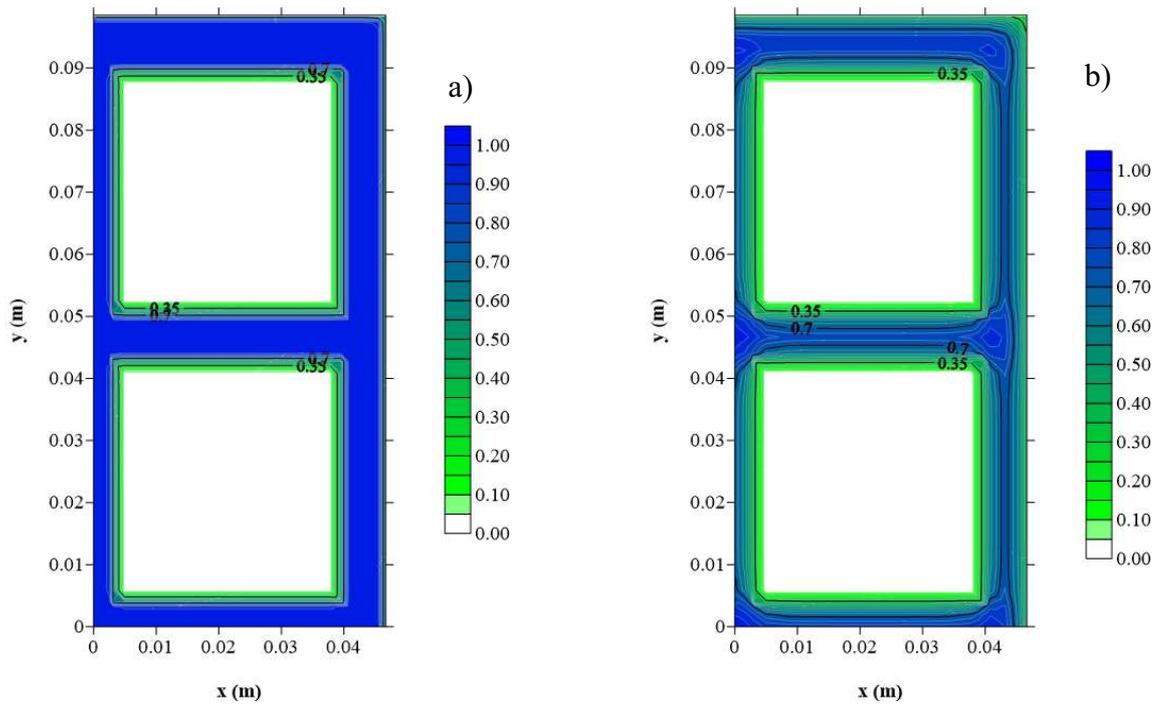
Figura 42 – Distribuição da tensão interna adimensional $(1 - \sigma_x^*)$ no plano $x = 24 \text{ mm} (\cong R_1 / 2)$ nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70° C.





Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 43 – Distribuição da tensão interna adimensional ($1 - \sigma_x^*$) no plano $z = 50 \text{ mm}$ ($\cong R_3 / 2$) nos tempos: a) 5 min e b) 120 min para uma temperatura de secagem de 70°C .



Fonte: Autoria própria (2018)

A Figura 42 e a Figura 43 apresentam a distribuição da tensão interna adimensional ($1 - \sigma_x^*$) no tijolo nos planos $x = 24 \text{ mm}$ ($\cong R_1 / 2$) e $z = 50 \text{ mm}$ ($\cong R_3 / 2$), respectivamente, considerando uma temperatura de secagem de 70°C e nos tempos de 5 e 120 min. Assim como para o teor de umidade

e para a temperatura, é possível verificar gradientes de tensões entre as regiões do centro e das superfícies, porém diferentemente M^* e θ^* e conforme já comentando pela Figura 41, as maiores diferenças entre essas regiões são justamente na parte inicial do processo e em temperaturas menores. Isso ocorre pois mesmo com pouco tempo de processo e/ou com temperaturas baixas, já se tem uma secagem e aquecimento considerável na superfície, de tal forma, que enquanto temos ΔM^* e $\Delta \theta^*$ muito baixos na região central, fazendo com que as tensões térmicas e hídricas sejam praticamente nulas ou se anulem, nas superfícies esses valores são altos e geram tensões próximas a admissíveis, principalmente de tração conforme apresentado também na Figura 41. Além disso, a ausência de uma linha neutra ao longo do tijolo, como apresentado nos trabalhos de Avelino e Lima (2007) e Hammouda e Mihoubi (2013), evidenciam também a predominância das tensões de tração.

Como já ressaltado, as regiões dos vértices são as mais preocupantes no tocante a possíveis efeitos indesejáveis como empenamentos, trincas e fraturas, em virtude dos maiores gradientes de umidade, temperatura e tensões se configurarem nesses locais. Além disso, deve-se ter em mente que o formato dos vértices (quinas) funciona como concentrador de tensões, sendo mais um fator que contribui para o aparecimento de trincas ou deformações indesejadas (AVELINO; LIMA, 2007). Para tentar minimizar esses problemas, a utilização de uma temperatura de 70° C se mostrou mais adequado para realização da secagem dos tijolos cerâmicos vazados, em virtude de se diminuir os gradientes citados anteriormente e manter um tempo razoavelmente curto para realização do processo.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos na simulação da secagem de tijolos cerâmicos vazados, pode-se concluir que:

- O modelo de difusão líquida se mostrou adequado para analisar a secagem de tijolos cerâmicos vazados, desde que se entenda o mecanismo de transporte de massa e calor envolvido nele e, dessa forma, se utilize os valores de propriedades termofísicas coerentes.
- Para a difusão líquida é recomendável utilizar os valores de coeficientes (efetivo) de difusão de calor e de difusão mássica da ordem de 10^{-9} a 10^{-1} , com o intuito de representar os efeitos da evaporação do líquido no interior do sólido.
- Em todos os planos, ao longo do processo e para todas as condições de secagem analisadas, observa-se gradientes de umidade, temperatura e tensões internas no interior do tijolo, principalmente entre as regiões centrais e as superfícies internas e externas.
- Os vértices são os pontos mais susceptíveis a trincas e distorções, pois são as regiões que secam e se aquecem mais rápido, resultando por consequência em altos valores de tensões termo-hídricas. Além disso, esses pontos são concentradores de tensões, o que aumenta ainda mais os valores de tensões internas nesses locais.
- Durante todo o processo de secagem do tijolo, as tensões internas no centro e na superfície são de tração, evidenciando assim o maior efeito da perda de umidade e consequente retração volumétrica.
- Os maiores gradientes de tensões ocorrem entre as regiões centrais e as superfícies, nos tempos iniciais e em temperaturas baixas, em contrapartida tais valores são bem

abaixo da tensão admissível, diferentemente do que ocorre em temperaturas altas e em maiores tempos de processo.

- Durante 240 min (4 hrs) de processo, para uma temperatura de secagem a 100° C, os valores de tensões alcançaram cerca de 80% da tensão mínima requerida pela NBR 15270, podendo-se inferir que com um maior tempo e/ou temperaturas maiores, esse limite é ultrapassado.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aplicar os modelos apresentados à secagem de outros produtos como tijolos de 10 e 12 furos, usados em construção civil como peças estruturais.
- Estudar as tensões termo-hídricas em blocos cerâmicos com diversos tipos de geometria, além dos efeitos causados por elas.
- Estudar as tensões termo-hídricas na secagem de tijolos cerâmicos vazados com a inclusão das tensões induzidas durante a conformação mecânica feita anteriormente à secagem.
- Estudar experimentalmente a secagem do tijolo cerâmico vazado e desenvolver um modelo para determinação dos coeficientes efetivos de difusão mássica e de difusão de calor.

REFERÊNCIAS

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações técnicas - Definição e Classificação**. 2017. Disponível em: <<http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em: 28 jun. 2017a.

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações técnicas - Processos de Fabricação**. 2017. Disponível em: <<http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>>. Acesso em: 29 jul. 2017b.

AHMAD, F. MUJAH, D. HAZAKIRA, H. SAFARI, A. Assessing the potential reuse of recycled glass fibre in problematic soil applications. **Journal of Cleaner Production**. v.35, p. 102-107. May 2012. ISSN 09596526. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/257408740_Assessing_the_potential_reuse_of_recycled_glass_fibre_in_problematic_soil_applications>. Acesso em: 17 out. 2018.

ALVARENGA, L. C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J. B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**. v.5, n.1, p.5-18, Junho 1980.

ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento, Louças Sanitárias e Congêneres. **A cerâmica na atualidade**. 2012.

ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. **História da cerâmica: a origem da cerâmica**. 2017. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/historia-ceramica>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

ANICER. Artigo “Segredos da Secagem e Queima”. **Revista da ANICER**, Ano 11, edição 53, Agosto, 2008.

ASPACER – Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento. **Estatísticas**. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270: Componentes cerâmicos Parte 1: Bloco cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos**. Rio de Janeiro, p. 8. 2005.

AVELINO, D. O.; LIMA, A. G B. de. Simulação numérica do transporte de calor e massa durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados. In: Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2, 2006, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: UFCG, 2006.

AVELINO, D. O.; LIMA, A. G B. de. Estudo das tensões durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados: modelagem e simulação. **Revista Pesquisa**, v.1, n.5, pp 635 – 652, 2007.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO J. S. **Secagem de materiais argilosos: modelagem, simulação e experimentação**. In: Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 4, 2007, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: UFCG, 2007.

BELA VISTA – Bela Vista Tijolos. **Processo**. 2017. Disponível em: <<http://www.belavistatijolos.com.br/processo.html>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: The AVI Publishing Company, 450 p., 1992.

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

CBC – Congresso Brasileiro de Cerâmica. **61cbc**. 2017. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/61cbc/>>. Acesso em: 06 ago. 2017.

CHERTMAN, M. **Secagem de papel produzido a partir do pseudocaule de bananeira**. 2007. p. 107. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

COSTA, V. Eflorescências, como Defeitos de Produção. **Tempo Técnico: Soluções Técnicas para Cerâmica**, [criciúma], n. 10, p.4-8, [201-].

COSTA, J. A. N. **Avaliação da secagem de Materiais de Construção**. 2013. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

DAMIANI, J. C. PEREZ, F. MELCHIADES, F. G. BOSCHI, A. O. Coração negro em revestimentos cerâmicos: Principais causas e possíveis soluções. **Revista Cerâmica Industrial**, v.6, n.2, mar/abr, 2001.

DIAS, G. **Propriedades mecânicas dos metais - conceitos de tensão e deformação**. 04 abr. 2011. Disponível em: <<https://tecnounifran.wordpress.com/2011/04/04/propriedades-mecanicas-dos-metais-conceitos-de-tensao-e-deformacao/>>. Acesso em: 07 dez. 2017.

FORTES, M. OKOS, M. R. **Advances in drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, v.1, p.119-154, 1980.

FREITAS, F. C. G. **Balço energético de um forno túnel de cerâmica estrutural convertido de lenha para gás natural**. 2007. 90 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

GUILHERME, J. **Análise de tensões**. 25 nov. 2016. Disponível em: <<http://ensur.com.br/analise-de-tensoes/>>. Acesso em: 28 mai. 2018.

GY CERAMICS - Guanyu Ceramics. **Definition of ceramics**. 2017. Disponível em: <<http://www.gy-ceramic.com/en/upload/product/pic-0-173-5.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2017.

- G1. Setor de cerâmica tem queda de 50% e demite 720 funcionários em Tambaú. **G1 Globo**, São Carlos e Araraquara, 16 abr. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/noticia/2015/04/setor-de-ceramica-tem-queda-de-50-e-demite-720-funcionarios-em-tambau.html>>. Acesso em: 14 fev. 2017.
- HAMMOUDA, I.; MIHOUBI, D. Modelling of drying induced stress of clay: elastic and viscoelastic behaviours. *Mech Time-Depend Mater*. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, vol. 18, p. 97-111, 2013.
- HASATANI, N.; ITAYA, Y. Deformation characteristic of ceramics during drying, In: 8 th International Drying Symposium (IDS, 92), 1992, Montreal, **Proceedings...** Montreal, 1992, pp 190-199, Parte A.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- HOROSTECKI, M. Modernização é alternativa para cerâmicas enfrentarem a crise. **Notícias do Dia**, Florianópolis, 22 abr. 2016. Disponível em: <<https://ndonline.com.br/florianopolis/noticias/modernizacao-e-alternativa-para-ceramicas-enfrentarem-a-crise>>. Acesso em: 13 fev. 2017.
- ICEMEG – Equipamentos Metalúrgicos. **Secadores para Telhas e Tijolos Semi-contínuos e Estáticos**. 2017. Disponível em: <<http://www.icemeg.com.br/se.php>>. Acesso em: 07 ago. 2017.
- KEEY, R. B. **Drying of Loose and Particulate Materials**. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1992, 502 p.
- KEUM, Y. T.; JEONG, J. H.; AUN, K. H. Finite element simulation of ceramic drying processes. **Modelling Simulation in Materials Science and Engineering**. UK, v.8, p. 541-556, 2000a.
- KEUM, Y. T.; J. H.; KIM, J. H.; GHOO, B. Y. Computer aided design of electric insulator. **Journal of Ceramic Processing Research**. UK, v.1, n.1, p. 74-79, 2000b.
- KEUM, Y. T.; OH, W. J.. Finite element simulation of ceramic drying process considering pore shape and porosity. **Modelling Simulation in Materials Science and Engineering**. v.13, p. 225-237, 2005.
- LIMA, A .G. B. **Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda**. 1995. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, Brasil.
- LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas**. 1999. 256 p. Tese (Doutorado), UNICAMP, S.P.
- LUCENA, C, G. **Transporte de massa durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados via volumes finitos**. Campina grande: Universidade Federal de Campina Grande, centro de ciências e tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005. Trabalho de conclusão de curso.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A, 2004.

MDIG – Metamorfose Digital. **As belas Vênus pre-históricas**. 2017. Disponível em: <<http://www.mdig.com.br/?itemid=7942>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

MILHOMENS, G.; CAMAROTTO, L.; MANZATO, M.; DERTONIO, R. **Indústria Cerâmica**. [201-]. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/5601493/>>. Acesso em: 06 ago. 2017.

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.

NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B.; NEVES, G. A.; BATISTA, V. R.; SANTANA, E. W. F.; BELO, F. A.; SANTANA, L. N. Experimental drying of ceramic bricks including shrinkage. **Proceedings** of the 18 th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto-MG. 2005. v. 1. p. 1-7.

NEVES, E. E.; YURI SHALOM, F. B. Método dos volumes finitos: uma abordagem prática e aplicação em problemas de difusão térmica com matlab®. **Carpe Diem: Revista Cultural e Científica do Unifacex**. v.11, n.11, p.1-18, 2013. ISSN: 2237-8586. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/260020051_METODO_DOS_VOLUMES_FINITOS_S_UMA_ABORDAGEM_PRATICA_E_APLICACAO_EM_PROBLEMAS_DE_DIFUSAO_TERMICA_COM_MATLABR>. Acesso em: 17 abr. 2018.

NOVAES, T. L. C. C. **Simulação da secagem de arroz em secador de leito fixo via volumes finitos**. 2010. p.69. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

OLIVEIRA, V. A. B. **Difusão em sólidos esferoidais prolatos: uma solução analítica**. 2001. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

OLIVEIRA, R. A; OLIVEIRA, W. P; PARK. K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.181-189, Jan/Abr 2006. ISSN 1809-4430. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162006000100020>. Acesso em: 29 jun. 2018.

OLIVEIRA, M. C.; BERNILS, M. F. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas brancas e de revestimentos** – São Paulo: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006, 90p (série P+L). - Disponível no site www.cetesb.sp.gov.br - Acesso em 11 de novembro de 2007.

OLIVEIRA, V. A. B; LIMA, A. G. B. Drying of wheat based on the non-equilibrium thermodynamics: a numerical study. **Drying Technology**. v. 27, p. 306-313, 2009.

OSSES, J. **O Método de volumes finitos**. 12 dez. 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/o-metodo-de-volumes-finitos/>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

PAPINI, C. A. **Materiais de Construção Civil: Materiais Cerâmicos**. [201-]. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/AquilesCampagnaro/cermicas-26467332?from_action=save>. Acesso em: 07 ago. 2017.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.16, n.1, p. 93-127, 2014. INSS 1517-8595.

PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying. A review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.32, n.1, p.1-29, 1985.

PARTI, M. Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.54, n. 4, p. 339-352, 1993.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 197 p.

PRIMAVERA – Cerâmica Primavera. **Processo Produtivo**. 2017. Disponível em: <<http://ceramicaprimavera.com.br/processo-produtivo.html>>. Acesso em: 09 ago. 2017.

ROCHA, A. F.; PALMA, M. A. M. Gestão da inovação e capacidade competitiva: uma análise não paramétrica no setor cerâmico de Campos dos Goytacazes, RJ. **Cerâmica**, vol.58, n.346, pp.244-252, 2012. ISSN 0366-6913. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132012000200016&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 27 dez. 2016.

ROMANINI, A. **Teoria das tensões**. 2016. Aula ministrada na disciplina mecânica dos sólidos II, do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Mato Grosso. Sinop. 2016.

SALEMA – Cerâmica Salema. **Processo Produtivo**. 2017. Disponível em: <<http://www.ceramicasalema.com.br/processo-produtivo/>>. Acesso em: 07 ago. 2017.

SANCHEZ, E.; BARBA, A. **Defeitos em revestimentos cerâmicos: suas causas e soluções**. Laboratório de Revestimentos Cerâmicos – Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) – Universidade Federal de São Carlos (UFCar), 1998.

SANCHES, C.; PÓLIS, M. **Análise econômica do setor de cerâmica brasileiro e as possibilidades de exportação**. 2012. Disponível em: <<http://www.unimep.br/phpg/mostracademica/anais/10mostra/5/314.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

SARAVACOS, G. D.; KOSTAROPOULOS, A. E. **Transport properties in processing of fruits and vegetables**. Food Technology, p. 99- 105, September 1995.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos**. 2008. Disponível em:

<<http://www.sebraemercados.com.br/wpcontent/uploads/2015/09/ESTUDO-CERAMICA-VERMELHA.pdf>>. Acesso em 04 de abril de 2016.

SILVA, W. P. **Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 2007. 263 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

SILVA, J. B. **Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados**. 2009. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

SILVA, L. D. **Técnicas analíticas e numéricas para a secagem de sólidos na forma de paralelepípedo**: uma abordagem tridimensional. 2012. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SILVA, L. D. da; SILVA, W. P. da; SILVA, C. M. D. P. S. and FARIAS, V. S. O. Descrição da secagem de placas cerâmicas por meio de um modelo de difusão. **Cerâmica** [online]. 2013, vol.59, n.351, pp.409-416. ISSN 0366-6913. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132013000300010>.

SILVA, L. A.; RESENDE, O; VIRGOLINO. Z. Z; BESSA, J. F. V. MORAIS, W. A. VIDAL, V.M. Cinética de secagem e difusividade efetiva em folhas de jenipapo. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.17, n.4, p.953-963, 2015. ISSN 1516-0572. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S151605722015000600953&script=sci_abstract&tlng=p>. Acesso em: 26 jun. 2018.

SILVA, D. A.; ANDRADE, T. A. G. Aspectos e impactos da atividade de cerâmica no município de Paraíba do Sul/RJ. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO AMBIENTAL E BIODIVERSIDADE, 5., 2016, Três Rios. **Anais... Três Rios: UFRRJ – ITR**, 2016. p. 221 - 226. Disponível em: <http://itr.ufrj.br/sigabi/wp-content/uploads/5_sigabi/Anais_5º_SIGABI.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2016.

SINDICER (PARAÍBA). **Dados do Setor**. Disponível em: <<http://www.sindicerp.com.br/setorceramico/#dados-do-setor>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. Theoretical and practical aspects of rough rice tempering. **Transactions of the ASAE**, v.23, n. 3, p.775-782, 1980.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T., 1986. **Drying: principles, science and design**. Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA, 448 p.

TESSETI, L. Crise já atinge empresas do setor cerâmico de revestimentos na região. **Jornal Cidade**, São Paulo, 2 nov. 2015. Disponível em: <<http://www.jornalcidade.net/rio-claro/crise-ja-atinge-empresas-do-setor-ceramico-de-revestimentos-na-regiao/25403>>. Acesso em: 13 fev. 2017.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Theory of elasticity**. Third Edition. McGraw Hill Education, New York, Indian Edition, 2010.

TRINDADE, M. F. S.; SOUZA, A. G.; SILVA, J. H. E.; SILVA, J. M.; SANTOS, I. M. G. Estudo comparativo entre massas para blocos cerâmicos provenientes de diferentes regiões da Paraíba. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 45, 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABCERAM. 2001.

UOL. Situação complicada para os donos das empresas de cerâmica vermelha em PE. **Rádio Jornal**, Recife, 18 jul. 2013. Disponível em: <<http://radiojornal.ne10.uol.com.br/2013/07/18/a-situacao-esta-cada-vez-mais-dificil-para-os-donos-das-empresas-de-ceramica-vermelha-em-pernambuco/>>. Acesso em: 14 fev. 2017.

VESTEEG, H. K.; MALLASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method**", Londres, Prentice Hall-Longman Group, 1995.

VIDAL-SALLÉ, E. FALGON, D. PECZALSKI, R. BOYER, J-C. Cumulative effect of pressing and drying on stress generation within a green ceramic compact. **Journal of Powder Technology**. v.2014, 9 p. April 2014. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jpt/2014/674782/>>. Acesso em: 17 out. 2018.