



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – PROF. MARIA JOSÉ DA PENHA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLOGIA E SAÚDE
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

DANIEL BERG DE LIMA FAUSTINO

**SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS NO FORMATO DE PARALELEPÍPEDO:
TEORIAS DE SECAGEM**

**ARARUNA
2016**

DANIEL BERG DE LIMA FAUSTINO

**SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS NO FORMATO DE PARALELEPÍPEDO:
TEORIAS DE SECAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Programa de Graduação em Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Processos Térmicos e de Secagem.

Orientador: Prof. MSc. Israel Buriti Galvão.

**ARARUNA
2016**

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

F268s Faustino, Daniel Berg de Lima
Secagem de tijolos cerâmicos no formato de paralelepípedo
[manuscrito] : teorias de secagem / Daniel Berg de Lima Faustino.
- 2016.
24 p. : il.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências
Tecnologia e Saúde, 2016.
"Orientação: Me. Israel Buriti Galvão, Departamento de
Engenharia Civil".

1. Tijolos 2. Construção civil 3. Engenharia civil I. Título.
21. ed. CDD 693.4

DANIEL BERG DE LIMA FAUSTINO

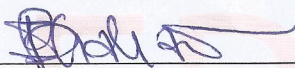
SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS NO FORMATO DE PARALELEPÍPEDO:
TEORIAS DE SECAGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Programa de Graduação em Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

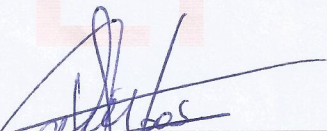
Área de concentração: Processos Térmicos e de Secagem.

Aprovada em: 19/05/2016

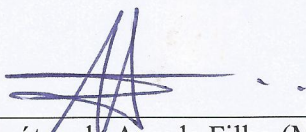
BANCA EXAMINADORA



Prof. MSc. Israel Buriti Galvão (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Daniel Berg da Cunha Campos (Membro Interno)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Nivaldo Timóteo de Arruda Filho (Membro Externo)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Aos meus pais, pela dedicação, companheirismo,
amizade e insistência, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Wandenberg, à minha mãe Ana Helena, à minha companheira Ingrid, ao nosso filho Arthur Berg, por compreenderem minha ausência nas reuniões familiares devido a todo esse tempo em outra cidade e a todas as pessoas de minha família que sempre estiveram presente.

Aos professores do Curso de engenharia da UEPB que contribuíram ao longo desses trinta meses, por meio das disciplinas e debates: Nivaldo, Daniel, Jamilton, Leidmar, Maria Cordão, Maria das Vitórias, Laércio, João Hugo, e em especial, ao meu orientador Israel Galvão por sua paciência e companheirismo.

À funcionária da UEPB, Joaline, pela presteza e atendimento quando nos foi necessário.

Aos colegas de classe pelos momentos de amizade, apoio, companheirismo em todos os momentos, em especial, Drielly, Elonir, Priscilla e Renata.

Aos colegas de curso e amigos, Thiago Alcântara, Lucas Diniz, Robson Kel, Igor Martins, Lucas Diego, Paulo Ricardo, Lucas Cerqueira, Dona Lú, Danilo, Diego, Bruno Padilha, Bruno “Careca”, Igor Lucena, entre outros.

Às amizades feitas dentro e fora da universidade.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para minha formação, meu muito obrigado.

“Na engenharia civil quando precisamos de pedras para construir e não as temos, também construimos as pedras.” Israel Buriti Galvão

SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS NO FORMATO DE PARALELEPÍPEDO: TEORIAS DE SECAGEM

Daniel Berg de Lima Faustino*

RESUMO

No presente artigo é apresentado um estudo inicial acerca das principais teorias de secagem. Trazemos os modelos empíricos e não-empíricos, em especial os modelos baseados em difusão e os modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis. Ademais, é apresentada uma proposta de estado da arte do tema no que se refere a secagem de tijolos cerâmicos no formato de paralelepípedo, onde são mostrados e trazidos a tona os trabalhos mais relevantes e a que se propõem. Baseando-se na viabilidade de estudar uma peça com tal geometria propomos também aplicações em outros materiais com o mesmo formato que são extremamente recorrentes na Engenharia civil, como vigas, pilares e estacas pré-moldadas.

Palavras-Chave: Secagem, Termodinâmica dos processos irreversíveis, Tijolos cerâmicos.

* Aluno de Graduação em Engenharia Civil na Universidade Estadual da Paraíba – Campus VIII.
Email: danielberg_engcivil@hotmail.com

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 SECAGEM.....	11
2.2 MODELO DIFUSIVO	13
2.3 MODELO BASEADO NA TERMODINÂMICA DO NÃO-EQUILÍBRIO – MODELO DE LUIKOV	14
2.4 CERÂMICA.....	17
3 CONCLUSÃO.....	21
REFERÊNCIAS	22

1 INTRODUÇÃO

Material cerâmico é um tipo de material cuja matéria-prima principal é a argila vermelha ou branca, constituída de silicatos de ferro, alumínio e magnésio. Consistem numa mistura de argilas que contêm uma quantidade de água de até 30 %, para moldagem plástica, produção rudimentar de tijolos, distribuída uniformemente em toda peça, e que deve ser evaporada.

Define-se cerâmica como sendo um material inorgânico, não-metálico obtido geralmente após tratamento térmico da massa cerâmica em temperaturas elevadas. Os materiais cerâmicos são fabricados a partir de matérias-primas que podem ser naturais e/ou sintéticas. As matérias-primas naturais, mais comuns, são: argila, caulim, quartzo, feldspato, filito, talco, calcita, dolomita, etc. As matérias-primas sintéticas incluem entre outras aluminas sob diferentes formas (calcinada); carbetto de silício e os mais diversos produtos químicos inorgânicos (NASCIMENTO, 2002).

A forma adequada para a secagem das peças cerâmicas é a da evaporação de água, por meio de fornecimento de calor, assim, a água é eliminada do corpo cerâmico por meio de aquecimento pelo ar quente circulante ou estático. Pode-se dizer que a secagem se dá pela eliminação, por evaporação, da água de conformação das peças cerâmicas por meio de ar aquecido. Ademais, o processo de secagem influi efetivamente na qualidade final do produto.

Existem problemas que ocorrem durante a secagem de tijolos a serem resolvidos. Com a secagem feita de forma incorreta, a retirada de água da peça fica sem controle, o que pode causar danos estruturais como trincas, deformações, empenamentos e, conseqüentemente, uma grande perda de produto. Com a criação de códigos computacionais para simular o processo de secagem é possível conseguir melhor controle de processo, otimizando a produção com redução de perdas e menor custo, evitando desperdício de matérias-primas (GONÇALVES, 2003).

Este trabalho consiste em uma revisão da produção científica acerca de estudos teóricos e experimentais da distribuição de temperatura e massa em sólidos cerâmicos em formato de paralelepípedo (tijolos) e em algumas geometrias arbitrárias (telhas), como também alterações na sua forma e qualidade devido à influência do percentual de água e o processo de secagem. Analisamos os modelos mais atuais e obsoletos que descrevem matematicamente esse processo, visando a comparação e avanço de sua eficiência, levando em consideração as

tensões, de acordo com a Lei de Fick e a Termodinâmica dos Processos Irreversíveis (Termodinâmica do Não-Equilíbrio).

O presente artigo tem como finalidade demonstrar as atividades que foram desenvolvidas para o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do Bacharelado em Engenharia Civil no Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde da Universidade Estadual da Paraíba, e tais atividades se tratam de um levantamento (revisão bibliográfica) sobre as atuais pesquisas sobre a secagem de tijolos e telhas cerâmicos com base na lei de Fick, ou na Termodinâmica do Não-Equilíbrio, também conhecida como Termodinâmica dos Processos Irreversíveis.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SECAGEM

Secagem, ou desidratação, consiste em separação parcial de um líquido (normalmente H_2O) da matéria sólida. Enquadra-se em um processo de transferência de calor e massa, consistindo na remoção de parte da umidade contida no interior do corpo por meio de evaporação (FORTES, 1982).

O processo chamado de secagem, que pode ser definido como sendo o processo de eliminar um líquido (comumente água) de uma substância, geralmente sólida, envolve fenômenos físicos diversos, como transferência de calor e massa, movimento e variações dimensionais. Disto nasce a necessidade da criação de modelos matemáticos, para tal processo, que se assemelhem o máximo possível (numericamente) com a realidade física. Para tal modelagem matemática, são considerados mecanismos de transporte de calor e umidade (energia e massa) no sólido submetido ao processo, variações dimensionais, coeficientes de difusão, condições externas ao sólido, dentre outros, para se ter maior fidelidade com a realidade.

O fenômeno de migração de umidade no interior do produto consiste em uma combinação de movimentos de umidade por difusão de líquido e de vapor, cada um predominando em certas etapas da secagem (STEFFE e SINGH, 1980).

Durante o processo de secagem, os sólidos sofrem variações nas suas características químicas, físicas e biológicas (quando existirem), o que, dependendo da intensidade desses efeitos, pode ocasionar perdas ou inutilizações de suas funções. Por exemplo, nos tijolos

cerâmicos, as características mecânicas, e aspectos comerciais podem ser drasticamente alterados.

O controle do processo de secagem e o conhecimento do mecanismo do movimento da umidade são fundamentais, uma vez que com dados de simulação e/ou experimentais tais, pode-se obter condições otimizadas, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (ALMEIDA et al., 2003).

O processo de secagem é bastante complexo. Modelar matematicamente tal processo tem sido foco de intensas pesquisas há décadas. Os modelos levam, geralmente, em consideração as propriedades termofísicas, cinética de secagem e balanço de massa e energia do secador. Dependendo da espessura da camada do material estudado, estes modelos podem ser classificados como modelos de secagem em camada fina (à nível de partícula) ou em camada espessa (à nível de secador).

Pode-se dividir os modelos de secagem em dois grupos: Modelos de Análise Concentrada e Modelos Distribuídos. Para o primeiro caso, as equações de secagem são classificadas como empíricas, não-empíricas ou teóricas; ademais, desprezam os efeitos de variação de temperatura e umidade no interior do material, durante o processo de secagem, supondo que a peça alcança a temperatura do ar instantaneamente. As equações mais completas são enquadradas nos Modelos Distribuídos.

Na tentativa de correlacionar dados experimentais da secagem de cada material particular a um modelo, tem sido apresentada uma gama de modelos que representam a cinética de secagem de cada produto em particular. Os vários modelos, propostos para descrever a perda de umidade durante o processo de secagem, podem ser divididos em três grandes grupos:

- Modelos empíricos e semi-empíricos;
- Modelos difusivos;
- Modelos baseados na termodinâmica do não-equilíbrio.

Os modelos empíricos consistem em uma correlação direta entre o teor de umidade e o tempo do processo de secagem, enquanto que os modelos semi-empíricos têm como base a hipótese da validade da Lei de Newton de resfriamento (geralmente válida para condições térmicas (Lei de Fourier) ou por transferência de calor por convecção, para transferência de calor por radiação térmica a Lei de Newton de resfriamento não é válida), na qual é assumido que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de umidade do material e seu respectivo teor de umidade de equilíbrio (teor de umidade constante que um corpo adquire

quando conservado durante certo tempo em ambiente de umidade relativa e temperatura sem variação), para as condições de secagem especificadas.

Esses modelos descrevem as taxas de transferência de calor e massa como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem e levam em consideração as resistências aos fluxos de calor e massa externos e internos.

Os modelos baseados na termodinâmica do não-equilíbrio assumem basicamente a validade das relações de reciprocidade de Onsanger, o princípio de Curie, e a existência de um equilíbrio termodinâmico local no interior do produto (LIMA, 1999).

2.2 MODELO DIFUSIVO

A difusão líquida é definida como sendo um processo físico de natureza aleatória no qual as heterogeneidades de concentração tendem a se reduzir alcançando o equilíbrio. Em um sólido homogêneo, a difusividade de massa equivale ao transporte de átomos e de moléculas no interior do sólido, alcançando a posição de equilíbrio estável (SILVA, 2010).

A Segunda Lei de Fick estabelece que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água, ou seja, a equação da difusão de massa no regime transiente, sem geração de massa, é dada por

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M), \quad (2.1)$$

onde M é o teor de umidade no sólido, D é o coeficiente de difusão e t o tempo.

A seguir, apresentaremos uma breve lista de alguns dos vários modelos de parâmetros empíricos expressando a difusão de umidade como função da temperatura e/ou do teor de umidade, listados e citados em (ZOGZAS e MAROULIS, 1996).

$$D(T, M) = A_0 \exp\left(A_1 M - \frac{A_2}{T_{abs}}\right) \quad (2.2)$$

$$D(T, M) = A_0 \exp\left(-\frac{A_1}{M} - \frac{A_2}{T_{ABS}}\right) \quad (2.3)$$

$$D(T, M) = A_0 \exp\left(\sum_{n=1}^3 A_n M^n - \frac{A_4}{T_{abs}}\right) \quad (2.4)$$

$$D(T, M) = A_0 [1 - \exp(A_1 M)] \exp\left(-\frac{A_2}{T_{abs}}\right) \quad (2.5)$$

$$D(T, M) = A_0 [1 + \exp(A_1 - A_2 M)]^{-1} \exp\left(-\frac{A_3}{T_{abs}}\right) \quad (2.6)$$

$$D(T, M) = A_0 \exp(A_1 M) \exp\left(-\frac{A_2 M + A_3}{T_{abs}}\right) \quad (2.7)$$

$$D(T, M) = A_0 \exp(M) \exp\left[-\frac{A_1 \exp(-A_2 M) + A_3}{T_{abs}}\right] \quad (2.8)$$

sendo A_0, A_1, A_2, A_3 e A_4 as constantes empíricas, T_{abs} a temperatura absoluta, em Kelvin e T a temperatura, em Célsius.

O coeficiente de difusão D , em geral, é considerado constante, ou depende da temperatura e/ou da umidade do sólido, assim, a compressão mecânica reduz a porosidade e a difusividade de umidade efetiva. Portanto, a pressão tem efeito negativo na difusividade de água (SARAVACOS e KOSTAROPOULOS, 1995).

A ideia de difusão líquida como único mecanismo de transporte de umidade tem sido criticada, devido a apresentar diferenças consideráveis entre os resultados experimentais e teóricos, que podem ser atribuídas à consideração do coeficiente de difusão constante, condições de contorno inadequadas e encolhimento do material, e também o fato de que a forma do corpo e fenômeno acoplado de calor e massa não são considerados. (LIMA, 1999)

2.3 MODELO BASEADO NA TERMODINÂMICA DO NÃO-EQUILÍBRIO – MODELO DE LUIKOV

Luikov estabeleceu a inter-relação entre a transferência de calor e massa em meios porosos não-saturados, homogêneos e isotrópicos, considerando o efeito termogradiante (LUIKOV, 1966; LUIKOV 1975). A partir dos fundamentos da termodinâmica do não-equilíbrio, o autor supracitado, estabeleceu os balanços de massa e calor na matriz porosa, desprezando efeitos de campo gravitacional, reações químicas e variações geométricas na matriz porosa; e admitindo que a temperatura da estrutura capilar e da mistura água/vapor são iguais em um elemento infinitesimal, bem como o teor de umidade transportado, que pode ser uma mistura de água/vapor. Em meios porosos (Figura 2.1), o processo de secagem é definido por um sistema de equações diferenciais acopladas para temperatura e umidade.

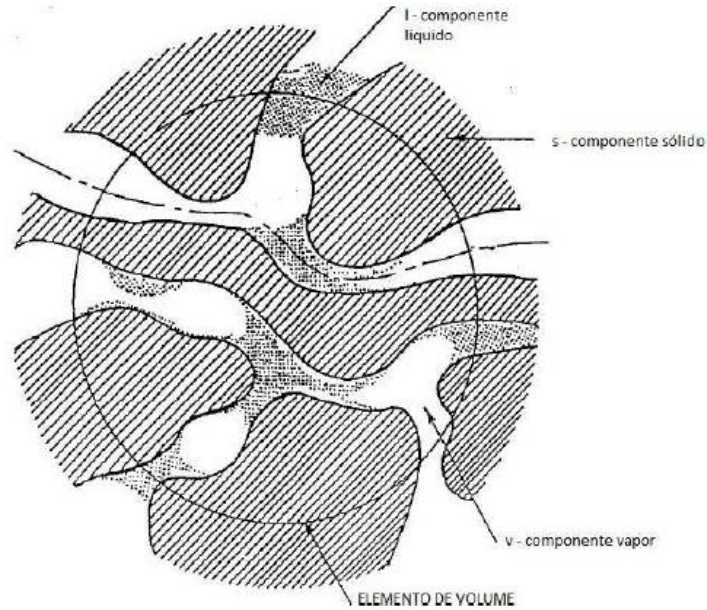


Figura 2.1: Poro

As equações são expressas da seguinte forma:

$$\rho_s c \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q + H_v I_v + H_l I_l \quad (2.9)$$

$$\rho_s \frac{\partial u_v}{\partial t} = -\nabla \cdot J_v + I_v \quad (2.10)$$

$$\rho_s \frac{\partial u_l}{\partial t} = -\nabla \cdot J_l + I_l \quad (2.11)$$

onde,

- c : calor específico do meio, e é dado por

$$c = c_s + c_v u_v + c_l u_l$$

- c_s : calor específico, à pressão constante, do meio seco; c_v e c_l o calor específico, à pressão constante, para água no estado de vapor e líquido, respectivamente;
- I_i : fonte ou sumidouro de massa devido à transição de fase;
- H_i : entalpia específica da substância;
- J_i : vetor fluxo de massa;
- q : vetor fluxo de calor;
- T : temperatura;
- t : tempo;
- u_i : teor de umidade;
- ρ_s : massa específica do meio seco.

Em suma, os índices acima são usados para identificar as componentes materiais:

s – meio seco;

v – água na fase de vapor;

l – água na fase líquida.

No sistema acima, considera-se que:

- As temperaturas de líquido, vapor e meio seco são iguais em uma unidade de volume infinitesimal;
- As mudanças de fases correspondem à mudança de líquido para vapor e de vapor para líquido, disto temos que $I_l = -I_v$;
- A massa do vapor é desconsiderada perante a do líquido, assim a quantidade de massa líquida pode ser considerada igual ao teor de umidade total, ou seja, $u = u_l$;
- As reações químicas não interferem ou são irrelevantes durante o processo;
- As variações na porosidade são desprezíveis, assim como no volume do meio devido ao teor de umidade.

Desconsiderando os efeitos convectivos em meios porosos, pela equação constitutiva de Fourier, temos

$$q = -k\nabla T \quad (2.12)$$

onde k é o coeficiente de condutividade térmica do meio.

O termo fonte, ou sumidouro, da equação (2.9) depende da mudança de fase da água contida no meio. Logo,

$$h_v I_v + h_l I_l = h_v I_v - h_l I_v = (h_v + h_l) I_v = \varepsilon \lambda \rho_s \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (2.13)$$

com $\lambda \in [0,1]$. Ademais, para os termos fonte de massa de vapor I_v ou o sumidouro de massa de água líquida I_l em processos transientes, temos

$$I_v = -I_l = \varepsilon \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.14)$$

com ε sendo o fator de mudança de fase, onde, se $\varepsilon = 0$, temos todo o teor de umidade contribuindo no termo de geração, está no estado líquido; e se $\varepsilon = 1$, então todo o teor de umidade transportado, está no estado vapor (LUIKOV, 1966; LUIKOV 1975).

Em meios capilares porosos, o fluxo de massa, nos espaços vazios da matriz porosa, pode ser escrito em termos do gradiente do teor de umidade e do gradiente de temperatura do meio (LUIKOV, 1966). Logo,

$$J_m = J_v + J_l = \rho_s a_m (\nabla u + \delta \nabla T) \quad (2.15)$$

onde, a_m e δ denotam a difusividade de massa e o coeficiente termogradiante, respectivamente.

A partir das equações (2.12) e (2.13), substituindo-as na equação (2.9) e (2.14), e a equação (2.15) substituindo-a nas equações (2.10) e (2.11), temos, respectivamente

$$\begin{aligned}\rho_s c \frac{\partial T}{\partial t} &= -\nabla \cdot q + h_v I_v + h_l I_l \Rightarrow \\ \Rightarrow \rho_s c \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla \cdot (k \nabla T) + \varepsilon \lambda \rho_s \frac{\partial u}{\partial t}\end{aligned}$$

e

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (a_m \nabla u) + \nabla \cdot (a_m \nabla T)$$

O sistema de equações

$$\begin{cases} \rho_s c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \varepsilon \lambda \rho_s \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (a_m \nabla u) + \nabla \cdot (a_m \nabla T) \end{cases} \quad (2.16)$$

vale para processos de secagem rápida e intensa, isto é, para $T \geq 100^\circ\text{C}$. Do contrário, o gradiente de pressão do meio se torna irrelevante, nos levando a necessidade de uma terceira equação em (2.16). Isto ocorre porque durante um processo de aquecimento intenso do material, o gradiente de pressão cresce devido à evaporação do líquido. O gradiente de pressão no meio causa o escoamento de fluidos nos poros (LUIKOV, 1966).

Supondo que o calor específico, coeficiente termogradiante, condutividade térmica e difusividade de massa constantes para todo o meio, o sistema (2.16) se torna

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \frac{\varepsilon \lambda}{c} \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial u}{\partial t} = a_m \nabla^2 u + a_m \nabla^2 T \end{cases} \quad (2.17)$$

Este sistema é chamado de Sistema Linear de Equações de Luikov (MIKHAILOV e ÖZISIK, 1984).

2.4 CERÂMICA

A argila é utilizada como material de construção desde 4.000 a.C., mas não se sabe ao certo a época e local de origem do primeiro tijolo. O homem teria passado a usar blocos secos ao sol quando as pedras naturais começaram a ficar escassas. O registro mais antigo de um

tijolo foi encontrado nas escavações arqueológicas na cidade de Jericó, no Oriente Médio, datado do período Neolítico inicial (ANICER, 2002).

A história da cerâmica caminha junto com a história da humanidade. A argila é utilizada em todas as sociedades – das mais antigas às modernas. Há achados arqueológicos datados de 5.000 a.C., na região de Anatólia (Ásia Menor). Na Grécia, eram comuns as pinturas em cerâmicas retratando cenas de batalhas e conquistas bélicas, e na China, a produção de peças estava relacionada à tradição religiosa (ITAÚ, 2016).

A cerâmica pode ser artística, produzindo artefatos de aplicações estéticas, ou uma atividade industrial, produzindo artefatos utilitários ou estéticos. O termo Cerâmica (do grego, *keramike*, derivação de *keramos*) compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, moldados durante sua fase plástica e submetidos à cocção, a temperaturas entre 900°C e 1000°C. Neste processo, denominado queima, a argila plástica adquire rigidez e resistência, mediante a fusão de alguns componentes da massa (SEBRAE, 2008).

No Brasil, a cerâmica tem sua origem na Ilha de Marajó, que compreendia técnicas de raspagem, incisão, excisão e pintura altamente elaboradas. Destarte, a tradição ceramista não chegou ao Brasil com os portugueses, nem veio junto com a bagagem cultural dos africanos. Os colonizadores, instalando as primeiras olarias, apenas estruturaram e concentraram mão de obra, modificando o processo nativo, muito rudimentar, com as tecnologias da época, a exemplo do uso do torno e das “rodadeiras”, conferindo simetria e acabamento mais refinado às peças (SEBRAE, 2008).

Atualmente, a cerâmica de construção brasileira ocupa um lugar de destaque na economia do país. Durante um longo período de produção de tijolos não ocorreram mudanças tecnológicas relevantes. Apenas nas últimas décadas que a tecnologia de fabricação de tijolos passou por um processo de desenvolvimento associado a inovações. Mesmo assim, é natural que outros processos e inovações ainda ocorram. Considerando também as variáveis operacionais, se torna cada vez mais importante, quando se considera a produtividade e qualidade, o conhecimento, em especial por parte dos técnicos e engenheiros envolvidos no processo produtivo, das variáveis de controle do processo, em particular aquelas relacionadas com as matérias-primas empregadas na preparação de massas (OLIVEIRA et al., 2005).

Por representar um setor de grande importância na geração de empregos e na distribuição de renda, tem merecido a atenção de setores do governo, institutos de pesquisa, universidades e entidades diversas (TAPIA, et al., 2000).

A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais, fizeram com

que as indústrias cerâmicas brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada (ABC, 2016).

As regiões que mais se desenvolveram foram a SUDESTE e a SUL, em razão da maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infra-estrutura, melhor distribuição de renda, associado ainda as facilidades de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, são nelas onde se tem uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. Convém salientar que as outras regiões do país têm apresentado um certo grau de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, principalmente nos segmentos ligados a construção civil, o que tem levado a implantação de novas fábricas cerâmicas nessa região (ABC, 2016).

No caso de secagem natural, há necessidade de cuidados adicionais. O processo é mais lento e muito empírico. Pode ocorrer, por exemplo, secagem abrupta, provocando o aparecimento tensões e trincas, que inviabilizam a ida da peça para o forno (queima). A fim de evitar isto, a distribuição das peças no secador deve permitir fluxo de ar uniforme, mas resguardadas de ventilação ou calor excessivos (ABC, 2016).

NASCIMENTO et al. 2005, apresentaram um estudo experimental da secagem de amostras de argila para cerâmica vermelha (blocos vazados e tijolos maciços), com diferentes dimensões e umidades iniciais. Nos processos de secagem, várias temperaturas e umidades relativas do ar foram usadas, e várias curvas da cinética de secagem e de retração volumétrica foram obtidas. Equações matemáticas para descrever a perda de água e variações dimensionais durante o processo de secagem foram propostas, verificando que o processo de secagem ocorreu no período de taxa decrescente e o encolhimento apresentou dois períodos distintos.

SU, 1997 considerou o estresse causado pela queda de umidade em um tijolo cerâmico durante a secagem (transferência de calor e massa em todas as fases). Tudo baseado na Termodinâmica do Não-Equilíbrio e assumindo um meio poroso isotrópico, as leis macroscópicas de conservação e o líquido-vapor de equilíbrio relação do tijolo de argila. Um conjunto de equações não-lineares para a estimativa da transferência simultânea de massa e calor durante o processo de secagem. Com base nos resultados obtidos, pôde-se concluir que a pressão no poro em vez de temperatura no sistema poroso desempenha um papel dominante na determinação da distribuição de tensões durante o período de queda da taxa de um processo de secagem, o que é consistente com o que ele observou.

SILVA, 2013 modelou tridimensionalmente a migração de água em uma placa paralelepípedica (em formato de paralelepípedo) de argila. Ademais, sua aproximação numérica foi condizente com os dados observados.

GATE, 2016 afirma que o processo de secagem dar-se em três fases (Figura 2.2). Na primeira fase, no início do processo de secagem a água evapora-se em primeiro lugar sobre a superfície do produto. Durante a secagem contínua a água intersticial, fase em que a partir da capilaridade, a água, é transportada do interior para a superfície do tijolo verde (bloco cerâmico que ainda não foi seco ou queimado). A taxa de água que é transportado para a evaporação na superfície depende inteiramente da intensidade do movimento de ar quente para secagem sobre e em torno do tijolo verde. Quanto mais água evapora-se sobre a superfície do produto, aumenta a velocidade de transporte de água do interior a primeira fase é atingida quando a evaporação move-se para o interior do produto. O calor migrará neste processo da superfície para o interior de modo que a água em forma de vapor difunde por ação capilar para a superfície. Este processo é acompanhado por uma súbita mudança de cor no produto na superfície.

Na segunda fase, o processo de secagem da água que envolve a evaporação de partículas de argila. A argila atingiu a chamada umidade crítica. É neste momento em que tijolos ou telhas podem rachar, ou as partículas de argila começam a se ligar. Este ponto não pode ser previsto ou calculado, em que ponto no processo de secagem da argila atingirá sua umidade crítica. Um teste de laboratório só conseguiu um valor aproximado e imagens de das condições de secagem bem definidos. Por esta razão os produtores de tijolos e telhas cerâmicas devem proteger o produto verde de radiação solar direta, a exposição de diferentes fontes de calor, de vento e qualquer outra forma de secagem desequilibrada.

Na terceira fase, ocorre a evaporação da umidade residual. Nesta fase a taxa de secagem pode ser aumentada pela fonte de calor em seu máximo e pela corrente de ar, a fim de atingir o limite mínimo de umidade de aproximadamente 3-5%. Se aparecer rachaduras junto a mudança de cor podemos dizer que o processo foi demasiadamente rápido ou muito intenso. Se a cor do produto verde não muda nesta fase, a secagem foi muito lenta com calor e correntes de ar insuficientes.

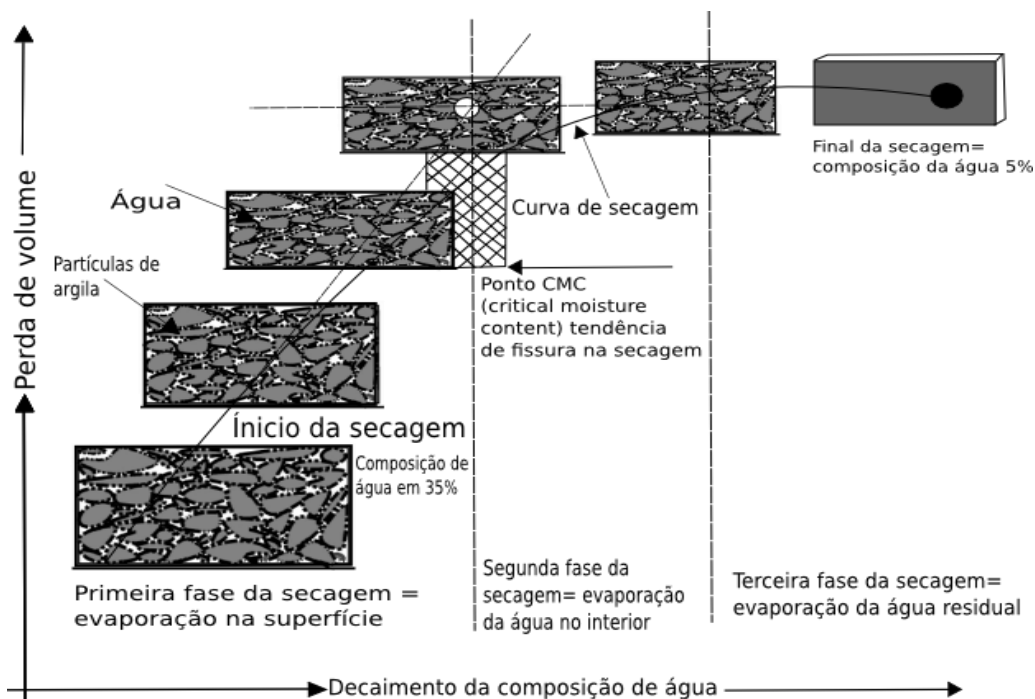


Figura 2.2: Gráfico da relação da quantidade de água com a perda de volume do bloco.

3 CONCLUSÃO

De acordo com a breve revisão bibliográfica, foi estudado definições de secagem e os modelos que descrevem o processo de secagem de tijolos cerâmicos, como os modelos empíricos e semi-empíricos, modelos Difusivos (Lei de Fick) e modelos baseados na termodinâmica do não-equilíbrio, onde foi observado que os modelos baseados na termodinâmica do não-equilíbrio são mais eficientes, pois com eles conseguimos acoplar num sistema a transferência de massa e energia, conseguindo um resultado bem próximo da realidade. Com este trabalho pretendemos estabelecer um esboço para uma revisão bibliográfica para uma possível dissertação de mestrado ou tese de doutorado que se proponham ao tema, tais com base e novas propostas e idéias para artigos.

Como o estudo foi feito para um bloco cerâmico num formato de paralelepípedo, podemos verificar a funcionalidade e aplicabilidade dos métodos de secagem para vigas, pilares ou estacas pré-moldadas, pois estes são do mesmo formato, porém com as dimensões maiores, mas o estudo dar-se também a nível de poro (no caso da termodinâmica do não-equilíbrio), viabilizando o estudo em vigas, pilares e estacas, fazendo com que a cura possa ser feita em menos dias sem adição de aditivos ou mudança do tipo de cimento, para que não haja perda de suas características mecânicas.

STUDY ON CERAMIC BRICKS DRYING IN PARALLELEPIPED SHAPE: DRYING THEORIES AND STATE OF THE ART

ABSTRACT

In this paper we have showed an initial study on the main drying theories. We bring the empirical and non-empirical models, in particular models based at diffusion and models based on the thermodynamics of irreversible processes. Moreover, it presented a proposal state of the art for the theme as regards the drying of ceramic bricks in the cobblestoned format, where are shown and brought to surface the most relevant papers and what those proposed. Based on the viability of the study of a piece with such geometry also propose applications in other materials with the same shape that are extremely recurrent in civil engineering, such as beams, columns and precast stakes.

Keywords: Drying, Ceramic briks, Thermodynamics of irreversible processes.

REFERÊNCIAS

ABC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERAMICA). Cerâmica no Brasil: introdução. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=2>>. Acesso: 17 mar. 2016.

ALMEIDA, G. da S.; CAVALCANTE, F. J. N.; LIMA, A. G. B. de. Transporte De Calor E Massa Em Sólidos Heterogêneos: Um Estudo Téorico Via Análise Concentrada. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.5, n.1, p.1-16, 2003.

ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica). Manuais – Bloco. Rio de Janeiro, 2002.

FORTES, M. Um estudo fundamental das equações de transporte de massa e energia em meios capilares porosos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Térmica, Universidade Federal de Minas Gerais, 100 p. Tese (Livre Docência), 1982.

GATE. basin BUILDING PARTENERSHIPS, Drying of clays bricks and tiles - Definitions. Disponível em <<http://www.gtz.de/basin>>. Acesso em 10 abr. 2016.

GONÇALVES, J. A. S. Materiais de Construção para seu projeto. Coleção Aprendendo a Construir, 2003.

ITAÚ. Enciclopédia Itaú Cultural de Artes Visuais. Cerâmica – Definição. Disponível em <http://www.itaucultural.org.br/aplicExternas/enciclopédia/IC/index.cfm?fuseaction=termostexto&cd_verbete=4849>. Acesso em 15 mar. 2016.

LIMA, A. G. B. Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas. 1999. 256p. Tese (Doutorado), UNICAMP, S.P.,

LUIKOV, A. V., Heat and mass transfer in Capillary-Porous Bodies. Pergamon Press, Oxford, 1966.

LUIKOV, A. V., Systems Of Differential Equations Of Heat And Mass Transfer In Capillary-Porous Bodies. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp 1-14. Pergamon - 1975.

MAIKHAILOK, N. D.; ÖZISIK, M. N., Unified Analysis and Solutions of Heat and Mass Diffusion. John Wiley, New York, 1984.

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.

NASCIMENTO, J.J.S. 2002. Fenômeno de Difusão Transiente em Sólidos Paralelepípedos. Caso estudado: Secagem de Materiais Cerâmicos, João Pessoa-PB, págs. 5-12.

OLIVEIRA, A. P. N.; MONTEDO, O. R. K.; PIZETE, J, CASAGRANDE, M. Matérias primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influências sobre as propriedades do produto final, 2005. Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica.

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

SEBRAE/ESPM. Cerâmica Vermelha. Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM - Relatório Completo, Sebrae Nacional, São Paulo, 2008.

SILVA, C. K. F da. Estimação de parâmetros de secagem de alimentos - Formulação de Luikov e uso da transformada integral generalizada. 2010. 125p. Tese (Doutorado), UFPB, João Pessoa - PB.

SILVA, W. P.; SILVA, L. D.; FARIAS, V. S. O.; SILVA, C. M. D. P. S. e. T Water migration in clay slabs during drying: A three-dimensional numerical approach. *Ceramics International* 139,4017–4030, 2013.

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.

SU, Shun-Lung. Modeling of multi-phase moisture transfer and induced stress in drying clay bricks. *Applied Clay Science* 12, 189-207, 1997.

TAPIA, R. E. C.; VILAR, S.C. Manual para a indústria de cerâmica vermelha. Rio de Janeiro, 2000. (Série Uso Eficiente de Energia).

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B. Effective moisture diffusivity estimation from drying data: a comparison between various methods of analysis. *Drying Technology*, v. 14, n. 7 e 8, p. 1543-1573, 1996.