

VARIAÇÃO DO TRANSPORTE DE MASSA NO INTERIOR DE UMA PLACA CERÂMICA

Lindalva Izidro da Silva¹
Valeska Barbosa de Brito²
José Rodrigues da Silva¹
Márcia Ramos Luiz³
Ivoneete Batista dos Santos⁴

RESUMO

No decurso do tempo, a secagem foi se tornando um processo essencial, especialmente quando relacionado ao setor industrial, onde a todo momento ocorre uma constante fabricação de corpos cerâmicos, tais como placas, telhas, tijolos, blocos, entre outros, que serão utilizados em diversas aplicações da construção civil. Para produzir e comercializar esses corpos cerâmicos é necessário preparar a matéria prima e a massa, construir as peças, secá-las para então armazená-las. A secagem que é um processo de transferência de calor e massa, também é bastante utilizada na indústria química, pois permite a retirada da água do sólido. A transferência de massa ocorre por meio da difusão, onde as moléculas de H₂O se movimentam para a superfície do sólido onde ocorre a evaporação. Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a transferência de massa ocorrida numa placa cerâmica plana por meio de uma modelagem matemática através de simulações em softwares não comerciais, utilizando o método integral baseado em Galerkin, considerando a condição de contorno de 1^a espécie e propriedades termofísicas constantes. Os resultados obtidos através das simulações foram analisados, discutidos e comparados com dados experimentais presentes na literatura de (SANTANA, 2006). A placa foi secada a uma temperatura de 110°C e umidade relativa do ar de 2,0%. Com o desenvolvimento da cinética de secagem foi possível analisar os gradientes de umidade presentes no interior da placa que foram diminuindo com o decorrer do tempo, desse modo, pode-se analisar que a transferência de massa ocorre do interior da placa para a superfície, no entanto quando há a presença de elevados gradientes de umidade no interior da placa, estes podem causar danos irreversíveis ao produto final.

Palavras-chave: Transporte de massa, Placa, Secagem, Software.

¹Graduandos do Curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, lindalvaizidro30@gmail.com, joserodrigues.1610ds@gmail.com;

²Graduanda do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, valeskabarbosa15@gmail.com;

³Professora do Departamento de Eng. Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, marciarluiz@servidor.uepb.edu.br;

⁴Orientadora e Professora do Departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, ivoneetebs@gmail.com.

INTRODUÇÃO

A secagem é um processo que já vem sendo utilizado desde o início das civilizações, seja para secagem de frutas, grãos, placas cerâmicas e diversas outras aplicações que vêm sendo discutidas por outros autores. Este processo de transferência de calor e massa consiste na eliminação de determinada quantidade de água de um produto específico. Como as placas cerâmicas são utilizadas em diversas aplicações, a indústria de materiais cerâmicos trabalha com processos de fabricação que passam por etapas como a preparação da matéria-prima e da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento, armazenamento e locomoção do produto.

O processo de secagem ocorre por dois meios: a difusão e a evaporação. Particularizando nosso estudo para o transporte de massa, parte da água presente no interior da placa se desloca para o exterior por meio da difusão, desse modo, faz-se necessário ter o conhecimento acerca de condições externas do meio em que está ocorrendo o processo da secagem da mesma, como a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade, pois por serem fatores que irão influenciar diretamente neste processo se apresentarem condições irregulares podem causar sérios danos ao produto final, como tensões, trincas, bolhas, empenos, etc., logo, é necessário eliminar essa água de forma lenta e gradual (OLIVEIRA, 2006).

O estudo desenvolvido analisou por meios de simulações computacionais o transporte de massa no interior de uma placa cerâmica plana, a uma temperatura de 110°C, para isso, utilizou-se o método GBI, a condição de contorno de Dirichlet (condição de contorno de 1ª espécie) e propriedades termofísicas constantes. Os resultados obtidos foram confrontados com estudos e resultados presentes na literatura de (SANTANA, 2006), que secou uma placa cerâmica com temperatura 110°C, com umidade relativa do ar de 2,0% e com os consecutivos teores de umidade: inicial $\Phi_0 = 0,097$ e de equilíbrio $\Phi_e = 0,000184$. Os resultados da cinética de secagem e do teor de umidade admissional obtidos através das simulações, foram apresentados, discutidos e analisados.

METODOLOGIA

O processo de transporte de massa no interior da placa será descrito através da 2ª lei de Fick, a qual descreve a difusão em regime transiente dos átomos, (BROOKER et al., 1992), no entanto, para que se adquirisse resultados consideráveis foi utilizado um modelo analítico e levado em consideração alguns aspectos estabelecidos, são eles:

- a) As propriedades termofísicas são constantes durante o processo;

- b) A placa é homogênea e isotrópica, e constituída de matéria seca e água na fase líquida;
- c) A distribuição de umidade no interior da placa é uniforme no início do processo;
- d) O fenômeno de secagem, através do transporte de massa, ocorre pela difusão da água no interior do material.

REFERENCIAL TEÓRICO

A variação do transporte de massa no interior da placa é dada pela seguinte equação diferencial:

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

A Equação (1) é chamada de segunda lei de Fick, nela D é a difusibilidade e M é o teor de umidade da placa no qual irá variar ao decorrer do tempo. A solução da Equação (1) é dada por (PAYNE et al., 1986):

$$M(x, y) = \sum C_n \psi_n(x, y) e^{-\gamma_n t} + M_e \quad (2)$$

onde: C_n é a n-ésima constante a ser determinada, ψ_n é a n-ésima autofunção, γ_n é o n-ésimo autovalor e M_e é o teor de umidade de equilíbrio. Considerando na Equação (2), C_n , γ_n , M_e e D constantes e ψ_n independente do tempo, teremos:

$$\sum [\psi_n \gamma_n + \nabla \cdot (D \nabla \psi_n)] = 0 \quad (3)$$

Sendo que ψ_n é a n-ésima autofunção, e obtida através de uma combinação linear de um conjunto de funções de base, sendo elas determinadas pela equação a seguir:

$$\psi_n = \sum d_{nj} f_j \quad (4)$$

onde, d_{nj} é uma constante a ser avaliada e f_j são elementos de conjunto de função de base. Substituindo a Equação (4) na Equação (3), obtém-se:

$$\sum d_{nj} [f_j \gamma_n + \nabla \cdot (D \nabla f_j)] = 0 \quad (5)$$

o procedimento de Galerkin agora passa a ser aplicado na Equação (5), onde ambos os lados desta equação são multiplicados por $f_i dv$ e integrados sob o volume (COLE et al., 2011):

$$\sum d_{nj} \left[\frac{1}{V} \int_V f_i f_j \gamma_n dV + \frac{1}{V} \int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV \right] = 0 \quad (6)$$

quando colocada na forma matricial de modo a aplicar as condições de contorno através do método de Cholesky, a Equação (6) tomará a seguinte forma:

$$(\bar{A} + \gamma_n \bar{B}) \bar{d}_n = 0 \quad (7)$$

onde \bar{A} e \bar{B} são matrizes quadradas de tamanho $N \times N$ elementos, e seus elementos são calculados através das seguintes equações:

$$a_{ij} = \frac{1}{V} \int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV \quad (8.a)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{V} \int_V f_i f_j dV \quad (8.b)$$

através dos cálculos das matrizes \bar{A} e \bar{B} , podemos obter valores para γ_n e \bar{d}_n . Dessa forma, para aplicar as condições de contorno, usa-se a seguinte identidade:

$$\int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV = \int_S D f_i \nabla f_j \cdot \bar{n} \cdot dS - \int_V D \nabla f_i \nabla f_j dV \quad (9)$$

considerando D como constante podemos reescrever a Equação (9) como:

$$\int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV = \int_S D f_i \left(\frac{\partial f_j}{\partial \bar{n}} \right) dS - \int_V D \nabla f_i \nabla f_j dV \quad (10)$$

desse modo, ao tratar de condição de equilíbrio em 1ª espécie (condição de Dirichlet), temos que $f_{ij} = 0$. Sendo assim, podemos notar que o 1º termo da Equação (10) é 0, enquanto que o segundo termo é sempre simétrico. Para obter o coeficiente C_n da Equação (2), usa-se em $t = 0$, $M = M_0$, que irá resultar em:

$$M_0 = \sum C_n \psi_n + M_e \quad (11)$$

voltando a utilizar o processo de Galerkin (COLE et al., 2011) obtém-se:

$$\int_V f_i (M_0 - M_e) dV = \int_V f_i \sum C_n \psi_n dV \quad (12)$$

a solução da Equação (12) será um conjunto de equações algébricas lineares que permitirá encontrar valores para C_n , assim solucionando o problema. Desse modo, o valor do teor de umidade médio presente no interior da placa é dado por:

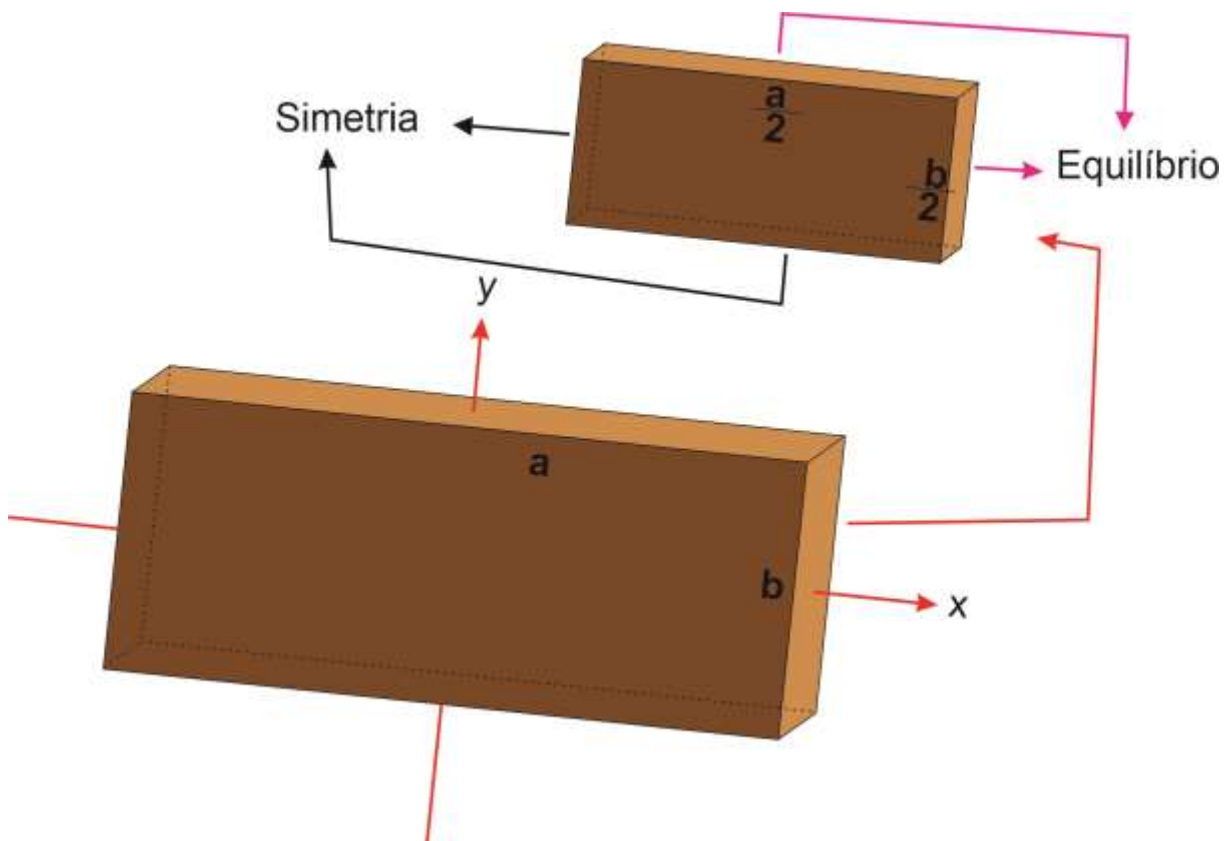
$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_V M dV \quad (13)$$

onde V corresponde ao volume da placa cerâmica em estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para este trabalho, foi utilizada uma placa de dimensões (120 x 60) cm² e foram levadas em consideração as mesmas dimensões e condições de secagem presentes na literatura de (SANTANA, 2006). A placa cerâmica plana está representada na Figura (1), determinada pela função de base da Equação (2), (SANTOS, 2013):

Figura (1): Contorno da placa cerâmica plana



Fonte: Autoria própria

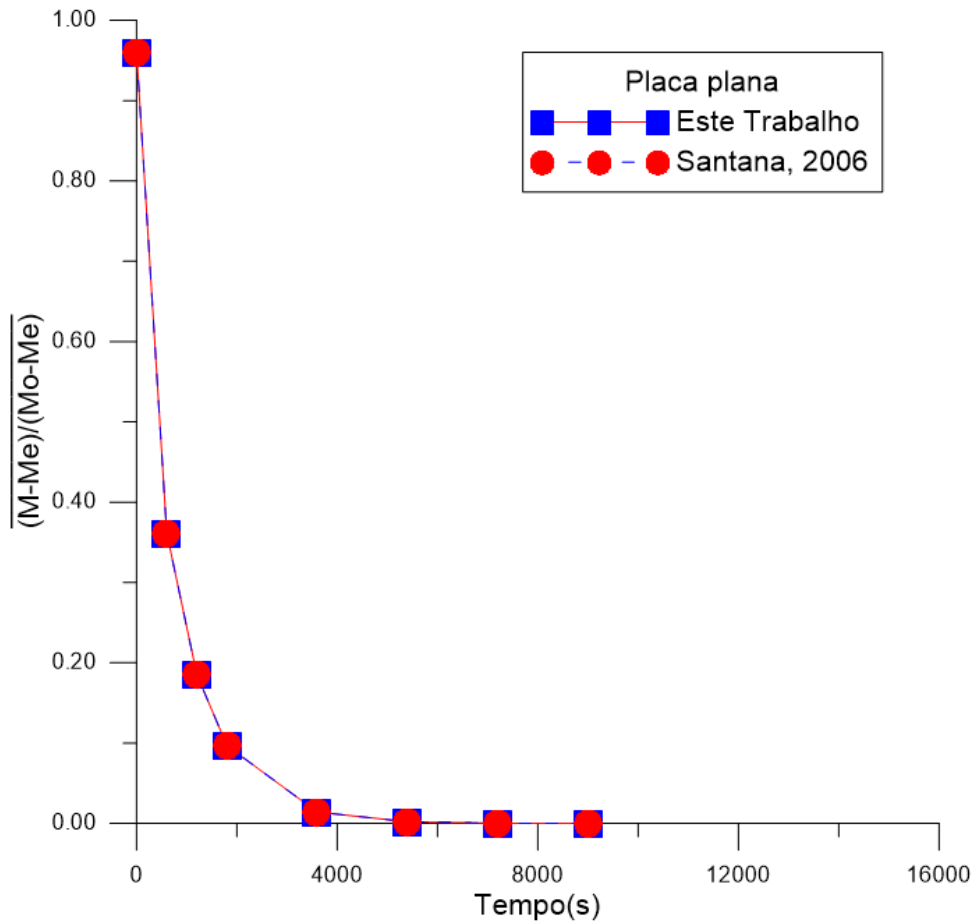
a função de base é representada por:

$$f_j^{(3)} = (a^2 - x^2)(b^2 - y^2) \cdot x^{(i-j)} \cdot y^j \quad (2)$$

Para simular e verificar a variação do transporte de massa da placa cerâmica plana foi utilizado um código computacional através da plataforma Mathematica®, versão 7.0 (WOLFRAM, 2009). O uso de programas de computadores para o processo foi essencial, de modo que permitiu que o processo de secagem fosse simulado sem que houvesse a necessidade de conhecimentos específicos de fenômenos envolvidos na formulação físico-matemática, esses programas como o Mathematica®, o Surfer, o Grapher e o Excel nos acompanharam até o final deste trabalho.

A validação é mostrada através da Figura (2) que representa a comparação dos dados obtidos através da simulação e os dados presentes na literatura de SANTANA (2006) de modo experimental.

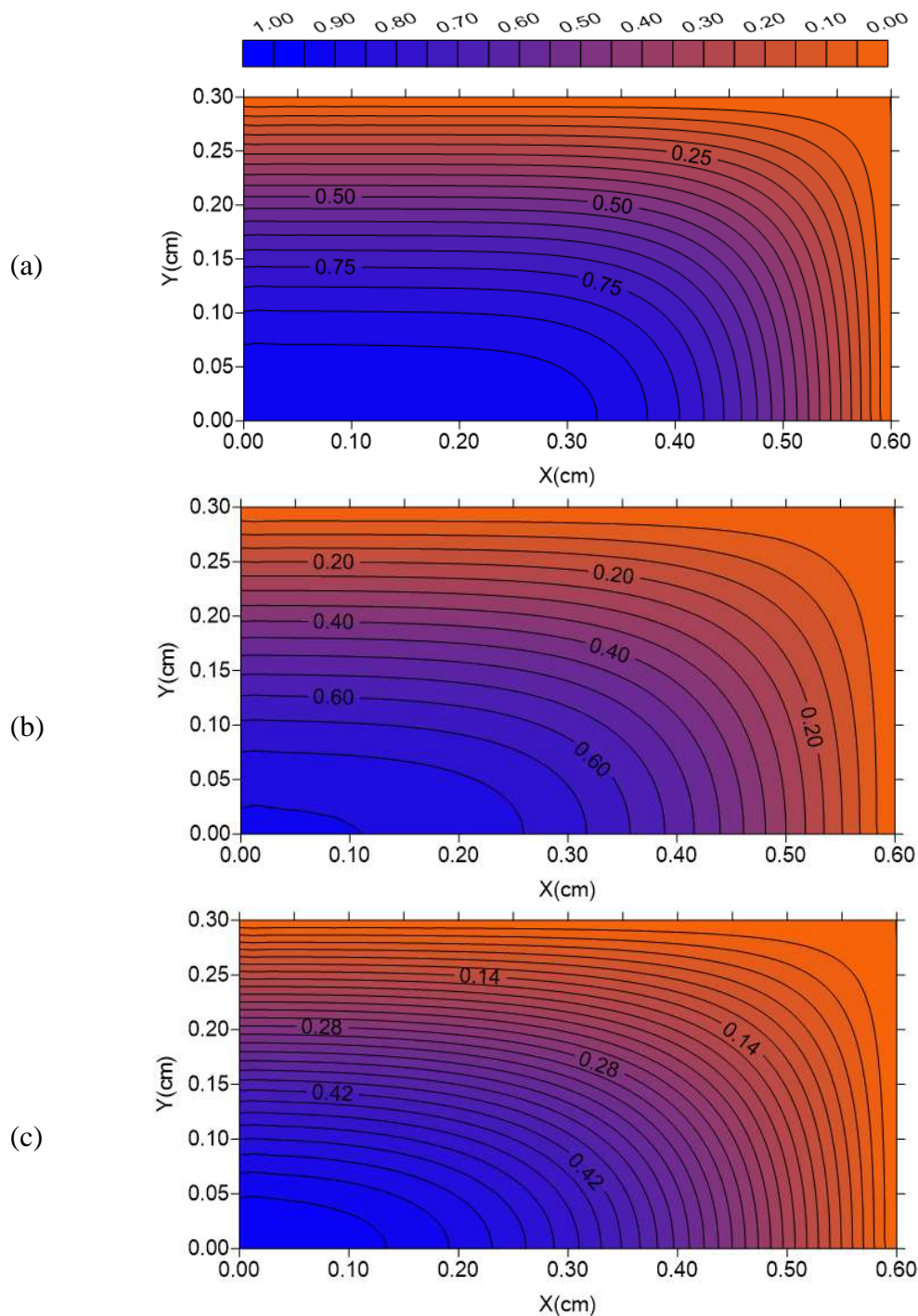
Figura (2): Comparação entre os dados presentes na literatura de SANTANA, 2006 e os dados obtidos no desenvolver deste trabalho



Fonte: Autoria própria

A partir da Figura (2), vemos que o teor de umidade adimensional vai diminuindo em função do tempo, tendendo a estabilidade após 4000 s, e que a curva de secagem é mais vertiginosa no início do processo. Esta análise foi realizada através do software Grapher, versão 10. Levando os aspectos da secagem em consideração, o software Surfer, versão 10.0 possibilitou a construção das curvas de umidade, Figura (3):

Figura (3): Distribuição do teor de umidade adimensional dentro da placa cerâmica para os seguintes tempos: (a) 300 s, (b) 600 s, (c) 900 s



Fonte: Autoria própria

A partir da Figura (3), é visível a existência de gradientes de concentração durante este processo de transferência de massa, o que nos leva a concluir que com o decorrer do tempo os gradientes de umidade presentes no interior da placa tendem a diminuir no decorrer do processo de secagem, e que a transferência de massa é mais rápida no início do mesmo em decorrência do fato de que as extremidades da placa estarem mais próximas do ar de secagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao finalizar este trabalho, pode-se concluir que o método integral baseado em Galerkin é eficiente para descrever o processo de transferência de massa em uma placa cerâmica utilizando a condição de contorno de 1ª espécie, a cinética de secagem permitiu constatar a variação de fluxo de umidade simulado neste trabalho e compará-los com os dados que está na literatura estudada, de forma que possibilitou a visualização de que com o decorrer do tempo o teor de umidade adimensional tende a se estabilizar.

Pôde-se verificar que a transferência de massa é influenciada por condições externas, este processo ocorre do interior da placa para a parte externa da mesma. De modo que foi possível a visualização dos gradientes de umidade no interior do sólido, mais presente especificamente no início da transferência de massa; pode-se visualizar na Figura(3), que elevados gradientes de umidade presentes no interior da placa pode ocasionar danos irreversíveis ao produto final, mas que estes podem ser evitados controlando o processo de secagem.

REFERÊNCIAS

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 3a edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 1990.

SANTANA, E.W. F. **Avaliação da secagem e queima de placas cerâmicas**, Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2006.

COLE, K. D.; BECK, J. V; HAJI-SHEIKH, A.; LITKOUHI, B. **Heat Conduction Using Green's Functions**. New York: Taylor & Francis, 2011, 666f.

SILVA, J. R. (Iniciação Científica); SANTOS, I. B. (Orientadora). **Simulação do transporte de massa em placas planas cerâmicas via método GBI, utilizando a condição de contorno de 1a espécie**. Campina Grande: 2021.

LIMA, A. G. B.; SANTOS, I. B.; SILVA, A. A. **Transferência de massa em sólido com forma arbitrária via método GBI: um estudo analítico**. Campina Grande: 2010.

SANTOS, J. P. S. **Secagem de Materiais Cerâmicos com Forma Complexa: Um Estudo Teórico Via CFX**. Campina Grande, 2018, 93f.