



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA DURANTE A SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS ARGILOSOS: UM ESTUDO ANALÍTICO

Mirenia Kalina Teixeira de Brito, mireniakalina@gmail.com¹.

Danilo Brito Teixeira de Almeida, danilo.bryto@gmail.com².

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br³.

^{1,3}Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande PB, CEP: 58429-900.

²Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande PB, CEP: 58429-900.

Resumo: Na manufatura de materiais cerâmicos argilosos, o produto é submetido as etapas de moldagem, secagem e queima. A secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução do teor de umidade do sólido, mediante o fornecimento de energia ao mesmo. Durante a secagem, dependendo das condições operacionais, podem surgir trincas, deformações e empenamentos que contribuem para reduzir a qualidade do produto pós-secagem. O transporte de umidade, do interior para superfície do material, pode ocorrer na forma líquida e/ou vapor, dependendo do tipo de produto e do percentual de umidade presente. Este trabalho apresenta um estudo analítico da secagem de sólidos paralelepípedicos. Foi desenvolvido um modelo matemático tridimensional transiente, baseado nas Leis de Fourier e de Fick, para prever a transferência de calor e massa que ocorre no sólido, considerando propriedades termo físicas constantes e condições de contorno de 3ª espécie (convecção). Todo o formalismo matemático e solução analítica via método de separação de variáveis das equações diferenciais parciais que compõem o modelo referenciado foram apresentadas. Para obtenção dos resultados, foi desenvolvido um código computacional no ambiente do Software Mathematica®. Aplicação foi dada a secagem de tijolos cerâmicos comuns. Resultados simulados das cinéticas de aquecimento e secagem do sólido paralelepípedo, bem como as distribuições do teor de umidade e temperatura durante o processo são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: Secagem, tijolos cerâmicos, modelagem, simulação, solução exata.

1. INTRODUÇÃO

A secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução do teor de umidade, do interior do material para a superfície mediante o fornecimento de calor. É nesta fase que a água em excesso que está contida no material é retirada. O transporte de massa ocorrido dentro de um determinado sólido pode se dar na forma líquida e/ou vapor, estando diretamente relacionado com o tipo do material e teor de umidade existente nele. O controle do processo de desumidificação e o conhecimento do mecanismo do movimento de umidade são de fundamental importância no processo e secagem, uma vez que com dados de simulação e/ou experimental, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (Nascimento, 2002).

Segundo Bergman et al. (2014) e Incropera e DeWitt (2001), a transferência de calor é definida como sendo o "trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura". Esse fenômeno pode acontecer por três processos diferentes que são: condução, convecção e radiação. Sempre que um corpo está a uma temperatura maior que a de outro ou, inclusive, no mesmo corpo existam temperaturas diferentes, ocorre uma cessão de energia da região de temperatura mais elevada para mais baixa, e a esse fenômeno dá-se o nome de transmissão de calor.

Várias teorias e modelos matemáticos, para descrever o processo de secagem, são reportados na literatura, dentre as quais pode-se citar a difusão líquida. Segundo Chemkhi et al. (2005), o coeficiente de difusão de massa de materiais argilosos depende principalmente do teor de umidade (em base seca), do produto e a temperatura do ar de secagem.

Soluções analíticas e/ou numéricas da equação de difusão, para diversas geometrias, condições de contorno e coeficientes difusivos constantes ou variáveis são encontradas na literatura, no entanto existem poucos resultados científicos obtidos a partir de geometrias tridimensionais (Murugesan et al., 2001; Khalili et al., 2014; Chemkhi et al., 2005; Silva et al., 2013; Almeida et al., 2013).

De acordo com Nascimento (2002) a cerâmica ou material cerâmico envolve todos os materiais inorgânicos, não metálicos, geralmente adquiridos logo após o tratamento térmico em elevadas temperaturas. Produtos cerâmicos são fundamentalmente determinados pelas matérias primas e pela microestrutura final. Portanto a tentativa de controle das propriedades do produto deve passar pelo entendimento e controle das propriedades básicas dos materiais, como o processo de fabricação (Almeida, 2009).

O tratamento compreende todos os processos de depuração, divisão, homogeneização e obtenção da umidade adequada da matéria prima, sendo a moldagem uma operação efetivada com o intuito de fornecer a forma desejada a massa cerâmica. Existem quatro processos básicos de moldagem que são: moldagem com pasta plástica consistente, com pasta plástica mole, com pasta fluida e a seco ou semi - seco (Bauer, 1994; Neves, 1998).

Após a moldagem, a peça cerâmica úmida passa por um processo de secagem com o intuito de reduzir o teor de umidade da mesma, para posteriormente ser submetido ao processo de queima.

Durante o processo de secagem, devido vários fatores operacionais, podem ocorrer trincas, empenamentos e deformações ocasionando à perda do material, causando prejuízos as empresas. Augier. et al. (2002), afirmam que quando o processo de secagem acontece com encolhimento, gradientes de umidade e deslocamento no material leva a tensões induzidas pela secagem. Assim o controle destas tensões é de extrema importância, pois pode levar a deformações e/ou rachaduras que afetam definitivamente a qualidade do produto.

Assim, o trabalho tem por objetivo apresentar um modelo matemático e sua solução analítica para prever a distribuição de temperatura e umidade em tijolos cerâmicos maciços com forma paralelepipedica, e suas respectivas cinéticas de aquecimento e secagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. A Geometria

Considere o problema de difusão de uma variável $\Phi(x,y,z,t)$ em um paralelepípedo sólido de dimensões $2R_1 \times 2R_2 \times 2R_3$, de acordo com a Fig. 1.

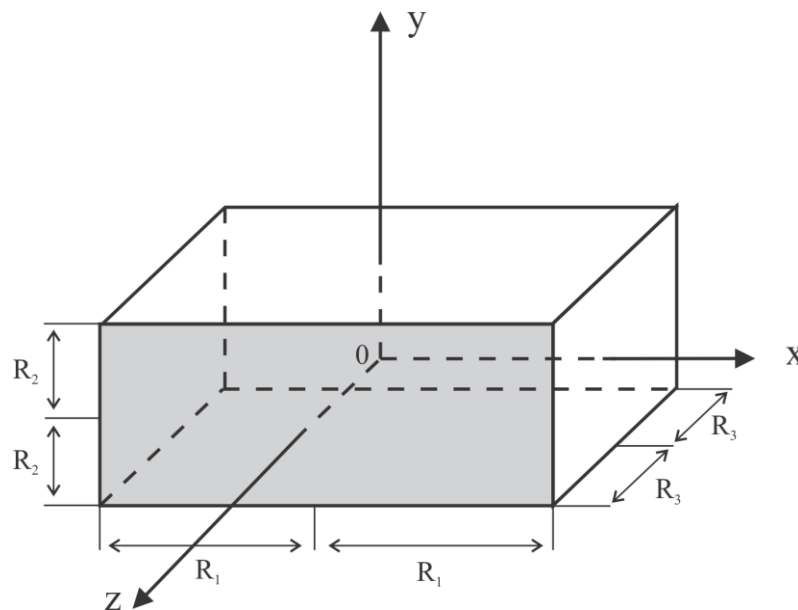


Figura 1. Configuração geométrica do problema físico

A equação diferencial que descreve o fenômeno de difusão neste sólido é da forma:

$$\frac{\partial(\zeta\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + \Phi''' \quad (1)$$

onde ζ e Γ^Φ são as propriedades do material, Φ''' representa a geração interna de massa ou energia, Φ é a variável de interesse e t é o tempo.

Como se trata de uma equação tridimensional transiente necessita-se de no mínimo, três condições de contorno na posição e uma no tempo.

Devido à simetria que existe neste sólido, considera-se apenas 1/8 do seu volume. Sendo assim a condição inicial, de simetria e de contorno do problema especificado são as seguintes:

- Condição inicial:

$$\Phi(x, y, z, t=0) = \Phi_0 \quad (2)$$

- Condição de simetria:

$$-\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x=0, y, z, t)}{\partial x} = -\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x, y=0, z, t)}{\partial y} = -\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x, y, z=0, t)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

- Condição de contorno:

$$-\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x=R_1, y, z, t)}{\partial x} = h[\Phi(x=R_1, y, z, t) - \Phi_e], \text{ em } t>0 \quad (4)$$

$$-\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x, y=R_2, z, t)}{\partial y} = h[\Phi(x, y=R_2, z, t) - \Phi_e], \text{ em } t>0 \quad (5)$$

$$-\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x, y, z=R_3, t)}{\partial z} = h[\Phi(x, y, z=R_3, t) - \Phi_e], \text{ em } t>0. \quad (6)$$

onde h é o coeficiente de transferência convectiva e Φ_e é o valor de Φ na condição de equilíbrio.

A solução geral do problema de difusão tridimensional transiente com as condições de contorno especificadas nas equações é obtida pela superposição de problemas unidimensionais em coordenadas cartesianas e no tempo, de placas infinitas, cujas intersecções formam o paralelepípedo (Gebhart, 1993; Luikov, 1968).

Para a solução analítica do problema usou-se o método de separação de variáveis. Encontrou-se primeiramente a solução analítica para uma dimensão, logo após multiplicou-se as soluções unidimensionais nas direções x , y e z obtendo assim a solução tridimensional, cujo resultado é dado por:

$$\Phi^* = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{n1} A_{m2} A_{k3} \cos(\beta_{n1} x) \cos(\beta_{m2} y) \cos(\beta_{k3} z) e^{-[\beta_{n1}^2 + \beta_{m2}^2 + \beta_{k3}^2] \frac{\Gamma \varphi}{\zeta} t} \quad (7)$$

sendo,

$$A_{ij} = \frac{2 \operatorname{sen}(\beta_{ij} R_j)}{\beta_{ij} R_j + \operatorname{sen}(\beta_{ij} R_j) \cos(\beta_{ij} R_j)} \quad (8)$$

$$\Phi^* = \frac{\Phi - \Phi_e}{\Phi_0 - \Phi_e} \quad (9)$$

e:

$$\cot g(\beta_{ij} R_j) = \frac{\beta_{ij} R_j}{Bi_j} \quad (10)$$

onde β são os autovalores, $j = 1, 2, 3$ e Bi é o número de Biot de transferência dado por $Bi = \frac{hL}{\Gamma \Phi}$.

Uma vez determinado o valor de Φ^* em cada ponto do corpo utiliza-se essa equação para encontrar o $\bar{\Phi}^*$, como segue:

$$\bar{\Phi}^* = \frac{1}{V} \int_V \Phi^* dV \quad (11)$$

dando como resultado,

$$\bar{\Phi}^* = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_{n1} B_{m2} B_{k3} e^{-[\beta_{n1} + \beta_{m2} + \beta_{k3}] \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \quad (12)$$

onde,

$$B_{n1} = \frac{2Bi_1^2}{(\beta_{n1} R_1)^2 [Bi_1^2 + Bi + (\beta_{n1} R_1^2)]} \quad (13)$$

$$B_{m2} = \frac{2Bi_2^2}{(\beta_{m2} R_2)^2 [Bi_2^2 + Bi_j + (\beta_{m2} R_2^2)]} \quad (14)$$

$$B_{k3} = \frac{2Bi_3^2}{(\beta_{k3} R_{31})^2 [Bi_3^2 + Bi_3 + (\beta_{k3} R_3^2)]} \quad (15)$$

sendo $Bi_1 = \frac{hR_1}{\Gamma^\Phi}$, $Bi_2 = \frac{hR_2}{\Gamma^\Phi}$ e $Bi_3 = \frac{hR_3}{\Gamma^\Phi}$.

Nas equações (7) e (12), 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, $\Gamma^\Phi = \rho D$, $\zeta = \rho$, $h = h_m$ e $\Phi = M$ (o teor de umidade do material). O coeficiente D , que aparece na formulação para transferência de massa, é denominado coeficiente de difusão ou difusividade de massa. Geralmente, é dependente da temperatura e teor de umidade do sólido.

Para a obtenção dos resultados analíticos, foram implementados dois programas computacionais, utilizando o software Wolfram Mathematica, sendo um para obter os autovalores β_n e outro para obter Φ^* e $\bar{\Phi}^*$.

Como aplicação, a metodologia foi utilizada para descrever a secagem de tijolos comuns de argila. Nas Tabelas 1 e 2 a seguir apresentam os dados da amostra (tijolos cerâmicos), que foi utilizada nas simulações, tal qual reportados por Nascimento (2002).

Tabela 1. Parâmetros experimentais do ar e do tijolo usado nas simulações.

Dados Experimentais									
Ar			Tijolo						Tempo de Secagem
$T_a(^{\circ}\text{C})$	UR (%)	V (m/s)	$M_o \times 10^{+1}$ (b.s.)	$M_e \times 10^{+3}$ (b.s.)	$\theta_o (^{\circ}\text{C})$	$2R_1$	$2R_2$	$2R_3$	t (min)
60	10	0,1	1,00	1,73	27,42	60,45	20,54	7,06	270

Tabela 2. Coeficientes de difusão e transferência convectiva usadas nas simulações.

Coeficientes de Transporte Estimados Pelos Modelos Numéricos					
k (W/mK)	c_p (J/KgK)	ρ (kg/m ³)	$D \times 10^{+8}$ (m ² /s)	$h_m \times 10^{+6}$ (m/s)	h_c (W/m ² . ^o C)
1,00	1673,51	1920	0,233	1,650	4,92

De posse destas informações experimentais, esses dados foram incorporados ao programa computacional desenvolvido para simular os resultados. Após obter-se os dados preditos do teor de umidade, estes foram usados para comparação com os resultados experimentais para encontrar o menor erro possível, usando a técnica do erro mínimo quadrático.

Desta forma foi possível obter o coeficiente de difusão de massa otimizado (Nascimento, 2002).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 ilustra a comparação entre os resultados preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo de secagem de tijolos cerâmicos comuns na temperatura de 60°C.

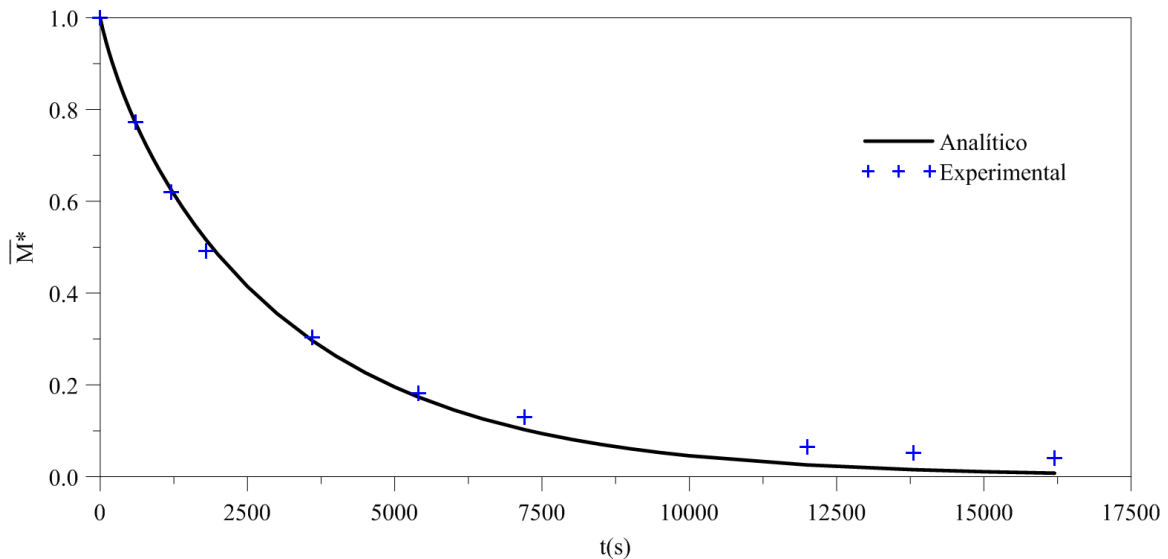


Figura 2. Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem.

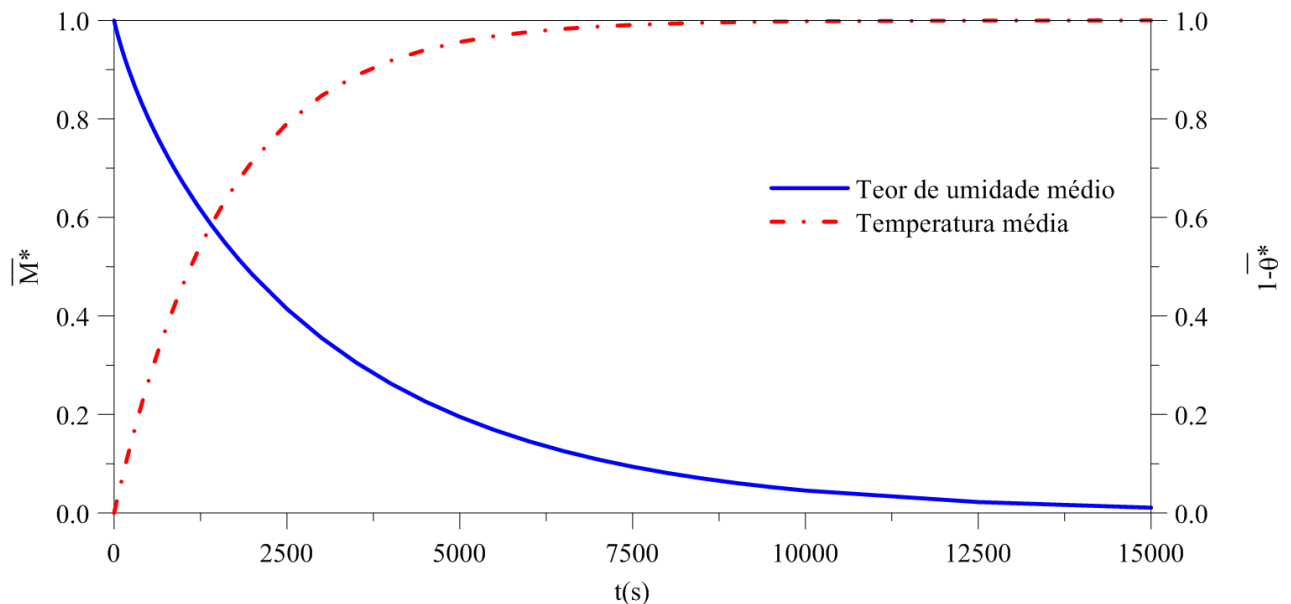


Figura 3. Predição do teor de umidade médio e temperatura média do tijolo em função do tempo de secagem.

Como pode ser visto na Fig. 1 os resultados analítico e experimental então praticamente superpostos indicando que o ajuste foi muito satisfatório. Baseado nesse resultado evidencia-se que os modelos matemáticos, representam fisicamente o problema tratado nesta pesquisa. No ajuste obteve-se um coeficiente de difusão de massa de $0,22 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ e um erro de $0,000605752 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)^2$. Um resultado de 5,58% menor que o valor reportado por Nascimento (2002).

A Figura 2 ilustra a variação do teor de umidade médio e a temperatura média do material em função do tempo. Observa-se que em aproximadamente 7500 segundos, o material atingiu seu equilíbrio térmico, mas ainda não atingiu o equilíbrio higroscópico. A partir desse instante, o processo de secagem ocorre de forma isotérmica, a uma taxa de secagem decrescente.

As Figuras 4 a 6 mostram a distribuição do teor de umidade no plano xy para diferentes tempos de processo.

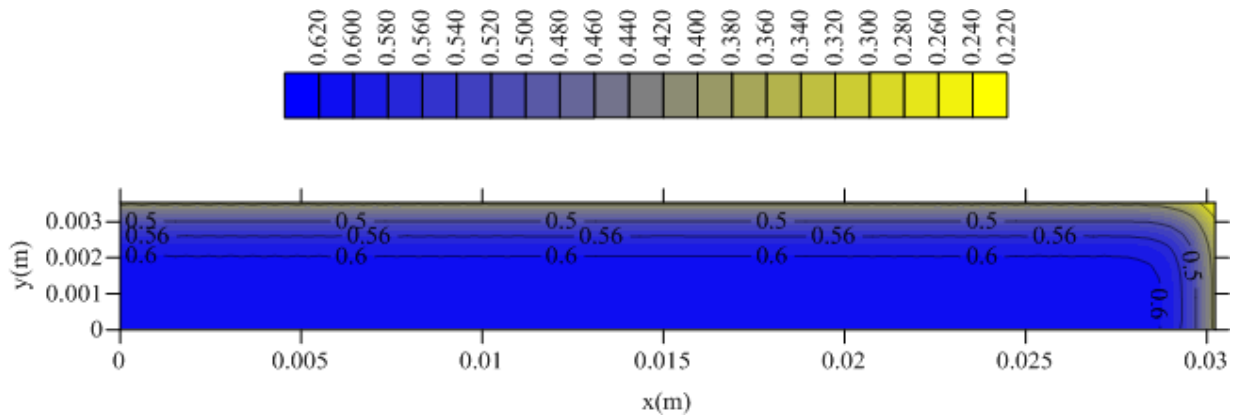


Figura 4. Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy em $t=200s$.

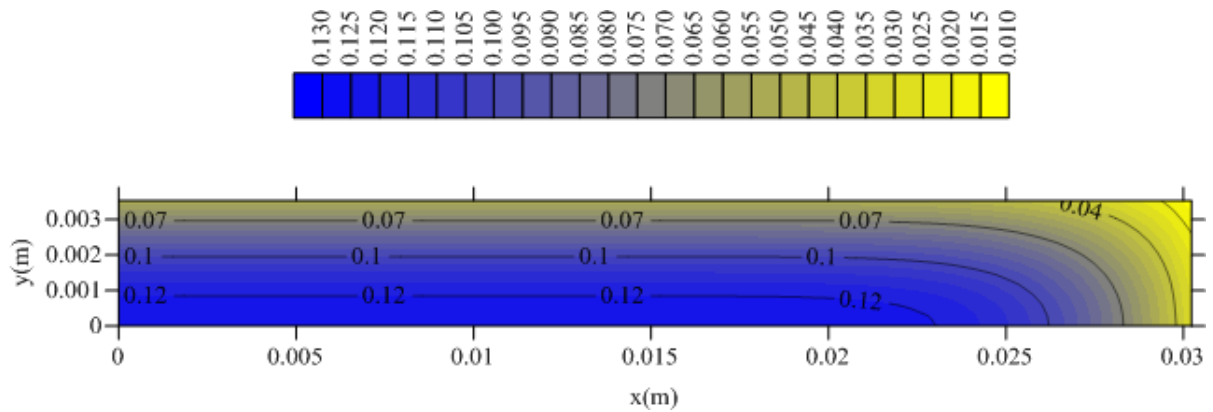


Figura 5. Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy em $t=3600s$.

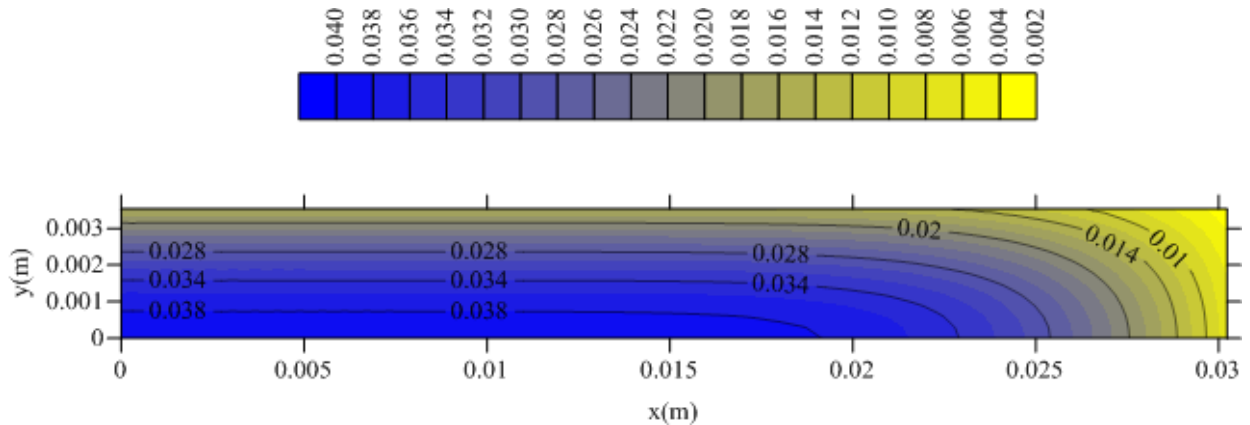


Figura 6. Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy em $t=7200s$.

Analisando essas figuras percebe-se que o material seca primeiro na superfície enquanto o centro continua consideravelmente úmido, indicando que o fluxo de umidade se dá do centro para superfície (secando de fora para dentro). Assim, devido à superfície do material secar mais rápido, principalmente nas pontas (que é onde tem os mais altos gradientes de umidade), as chances de ocorrer trincas nesse local são bastante altas. O mesmo comportamento foi observado também nos planos xz e yz .

As Figuras 7 a 9 ilustram a distribuição da temperatura no plano xy em diferentes tempos de secagem.

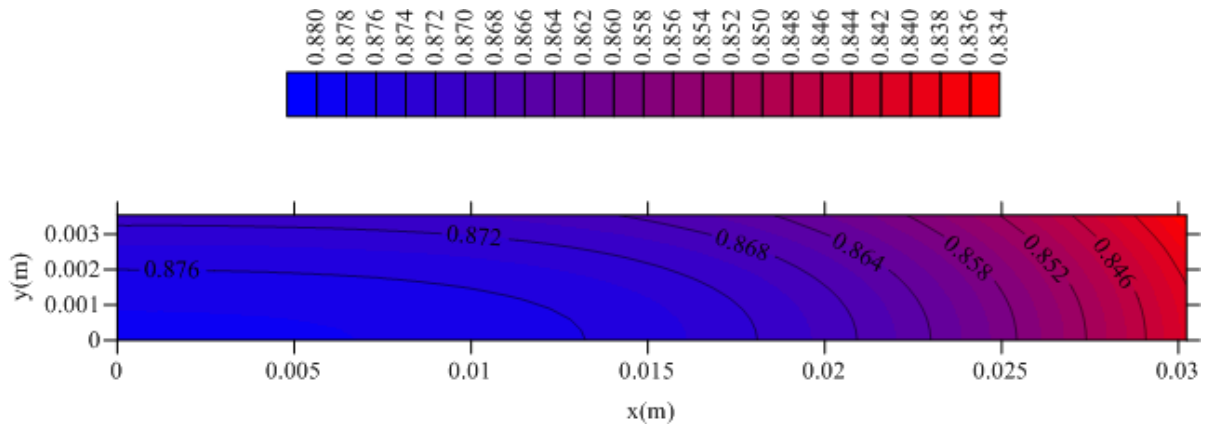


Figura 7. Distribuição de temperatura adimensional (θ^*) no plano xy em $t=200s$.

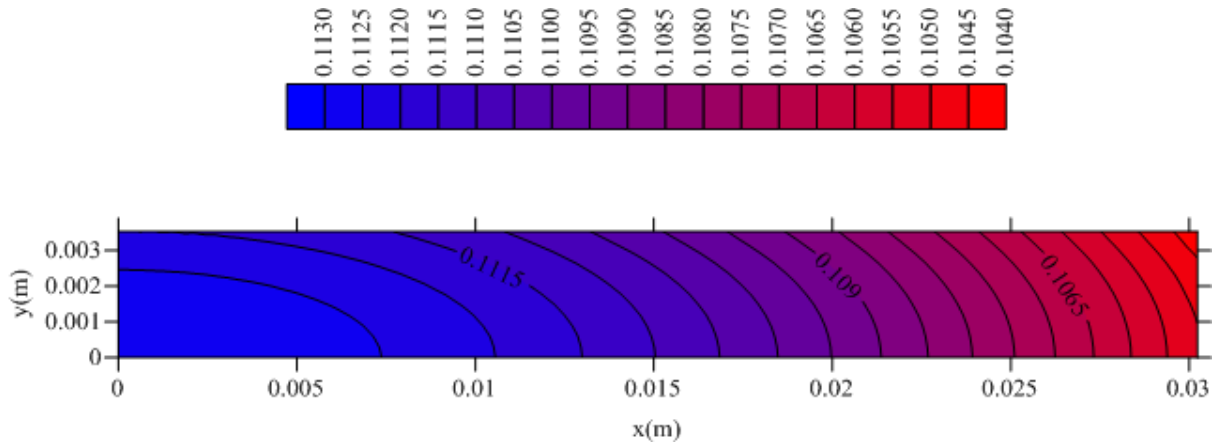


Figura 8. Distribuição de temperatura adimensional (θ^*) no plano xy em $t=3600s$.

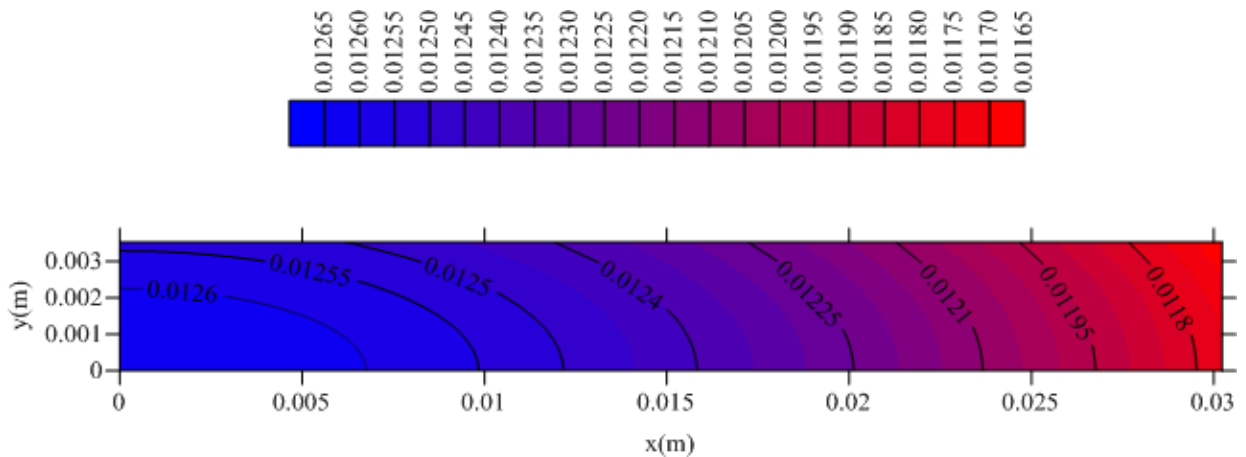


Figura 9. Distribuição de temperatura adimensional (θ^*) no plano xy em $t=7200s$.

Neste caso, o fluxo de calor se dá de fora para dentro do material. Verifica-se também, que nas pontas encontram-se altos gradientes de temperatura podendo ocorrer nestes locais trincas e deformações mais acentuadas.

Assim, pode-se afirmar que o fluxo de umidade se dá do centro para superfície e o fluxo de calor ocorre da superfície para o centro. Altos gradientes de umidades geram tensões hídras e altos gradientes de temperatura geram tensões térmicas. Portanto, é de extrema importância controlar o processo de secagem para que os produtos não sejam danificados, pois isso acontecendo implica no aumento de custos para as empresas.

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que o fluxo de umidade se dá do centro para superfície do sólido, e o fluxo de calor ocorre de forma inversa ao fluxo de umidade. Assim, altos gradientes de umidade geram tensões hídras

e altos gradientes de temperatura geram tensões térmicas. O controle deste processo de secagem é de extrema importância, pois dependendo das tensões geradas no interior do material durante o processo de secagem podem surgir deformações consideráveis nos produtos fabricados, aumentando assim os custos e prejuízos das empresas.

Por fim, o modelo utilizado para descrever o processo representa muito bem o processo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, CAPES, FINEP e UFCG pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Nascimento, J.J.S., 2002, "Fenômeno de Difusão Transiente em Sólidos Paralelepípedos. Caso estudado: Secagem de Materiais Cerâmicos", João Pessoa: Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba - Campus I, Tese (Doutorado), 181p.
- Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., 2014, "Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa", Ed. 7, Rio de Janeiro:LTC, pp. 2-4.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., "Fundamentos de Transferência de Calor e Massa", Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- Chemkhi, S. and Zagrouba, F., 2005, "Water diffusion coefficient in clay material from drying data", Desalination, Vol. 185, No. 1-3, pp 491-498.
- Almeida, G.S., Silva, J.B., Silva, C.J., Swarnakar, R., Neves, G.A. and Lima, A.G.B., 2013, "Heat and mass transport in an industrial tunnel dryer: Modeling and simulation applied to hollow bricks", Applied Thermal Engineering, vol. 55, No. 1-2, pp 78-86.
- khalili, K., Bagherian, M. and Khisheh, S., 2014, "Numerical simulation of drying ceramic using finite element and machine vision", Procedia Technology, Vol. 12, pp 388-393.
- Murugesan, K., Suresh, H.N., Seetharamu, K.N., Narayana, P.A.A. and Sundararajan, T., 2001, "A theoretical model of brick drying as a conjugate problem", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, No. 21, pp 4075-4086.
- Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Silva, L.D. and Farias, V.S.O., 2013, "Drying of clay slabs: Experimental determination and prediction by two-dimensional diffusion models", Ceramics International, Vol. 39, No. 7, pp 7911-7919.
- Augier, F., Coumans, W.J., Hugget, A. and Kaasschieter, E.F., 2002, "On the risk of cracking in clay drying", Chemical Engineering Journal, Vol. 86, No. 1-2, pp 133-138.
- Gebhart, B., 1993, "Heat Conduction and Mass Diffusion", New Yourk: McGraw-Hill, 634p.
- Luikov, A.V., 1968, "Analytical heat diffusion theory", London: Academic Press, Inc. Ltd., 684p.
- Almeida, G.S., 2009, "Simulação e Experimentação da secagem de Cerâmica vermelha em Sistemas Térmicos Industriais", Tese (Doutorado), Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 211p.
- Neves, G.A., 1998, "Introdução à ciência dos materiais - Materiais Cerâmicos", Curso Especial PRÓ-DESING-SENAI-CNTCC/SENAI-PB.
- Bauer, L.A.F., 1994, "Materiais de construção", 2 ed., Rio de Janeiro, LCT, 935p.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

HEAT AND MASS TRANSFER DURING DRYING OF CLAY CERAMIC BRICKS: AN ANALYTICAL STUDY

Mirenia Kalina Teixeira de Brito, mireniakalina@gmail.com¹.
Danilo Brito Teixeira de Almeida, danilo.bryto@gmail.com².
Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br³.

^{1,3}Federal University of Campina Grande, Center of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande PB, CEP: 58429-900.

²Federal University of Campina Grande, Center of Science and Technology, Department of Electrical Engineering, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande PB, CEP: 58429-900.

Abstract. *In the manufacture of clay ceramic materials, the product undergoes the steps of molding, drying and firing. Drying is a thermodynamic process which occurs through the reduction of the moisture content of the solid by supplying energy thereto. During drying, depending on operating conditions may arise cracks, deformation and warping which contribute to reducing the quality of the product after drying. Moisture transport from the inside to surface of the product can occur in liquid and/or vapor form, depending on the type of product and moisture content. This paper presents an analytical study of the drying of a parallelepiped solid. It was developed a transient three dimensional mathematical model based on Fourier and Fick's Laws to predict the heat and mass transfer that occurs in solid, considering constant thermo physical properties and boundary conditions of 3rd Kind (convection). All mathematical formalism and analytical solution using the method of separation of variables of the partial differential equations of the referred model has been presented. For obtain the results, it was developed a computational code using the Mathematica commercial software. Application was done to ceramic brick drying. Simulated results of heating and drying kinetics of the parallelepiped solid, as well as distributions of moisture content and temperature during the process are presented and discussed.*

Keywords: *Drying, ceramic bricks, modeling, simulation, exact solution.*