

GRADIENTES DE TEMPERATURA OU UMIDADE ADIMENSIONAL EM MEIO POROSO: UM ESTUDO NUMÉRICO E ANALÍTICO

José Jefferson da Silva Nascimento. E-mail: jefferson.nascimento@ufcg.edu.br

Carlos Bruno Barreto Luna. E-mail: brunobarretodemaufcg@hotmail.com

Bianca Thamires Alexandre Silva. E-mail: biancathamires1@gmail.com

Bruna Thalita Alexandre Silva. E-mail: brunathallyta@hotmail.com

Amanda Rafaela Silva de Almeida: amandarafaela330@gmail.com

Resumo: Este trabalho teve como objetivo estudar o fenômeno da redução de umidade em meios porosos, utilizando simulação computacional no software Mathematica, para casos unidimensionais e tridimensionais em coordenadas cartesianas. Perfis de temperatura e de umidade, bem como da cinética do fenômeno de transferência de calor e/ou massa no interior de um produto cerâmico, são evidenciados de acordo com a variação do número de Biot e Fourier sob o ponto de vista de danos estruturais. Os resultados evidenciam que a forma do corpo interfere na cinética de secagem e aquecimento, assim, temperaturas do ar de secagem elevadas e umidades relativas baixas, implicam numa secagem mais rápida do material. Quando as temperaturas e umidades relativas do ambiente de secagem são as mesmas para corpos de prova com dimensões diferentes, o teor de umidade inicial e relação área/volume dominam a cinética da secagem. O número de Biot associado a condições convectivas e as propriedades de transporte interferem fortemente nos gradientes de temperatura e/ou umidade, portanto é importante o controle do processo para evitar trincas e deformações no meio poroso. Os resultados obtidos da cinética de secagem se adequam muito bem em termos estatísticos ao modelo proposto, sendo assim possível calcular numericamente em trabalhos futuros os coeficientes de transferência de massa e de difusão.

Palavras-chave: Secagem, Cerâmica, Simulação.

TEMPERATURE GRADIENTS OR ADDITIONAL MOISTURE IN POROUS MEANS: AN ANALYTICAL AND NUMERICAL STUDY

Abstract: This work aims to study the moisture reduction phenomenon in porous media, using mathematical simulation for one-dimensional and three-dimensional cases using Mathematica software, so that before the process variables to be shown the risk of fractures, cracks and deformations. Profile dimensionless quantities (temperature and / or mass) as well as kinetic phenomena, considering one-dimensional or three-dimensional geometry, are shown in accordance with the variation of the Biot number and Fourier. The results show that the shape of the body interferes with the kinetics of drying and heating, as well as the high drying temperatures and low relief and faster moisture of the material. When drying temperatures and moisture are the same for specimens of different sizes, the initial moisture content and the ratio area/volume dominate the kinetics of drying. The number of Biot associated with convective conditions and as transport properties strongly interfere with the temperature and/or moisture gradients, so process control is important to avoid cracking and deformation in the porous medium. The results obtained from the kinetics of drying are adequate to the statistical model very well, and it is therefore possible to calculate mass transfer and diffusion coefficients in future works

Keywords: Drying, Ceramics, Simulation.

1. INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica brasileira tem grande importância para o país, tanto na geração de empregos, quanto na criação de divisas, sendo estimada uma participação de aproximadamente de 1% do PIB(MORAIS et al., 2015; RAMOS et al., 2010).

O Brasil é um grande produtor de argilas para a indústria de cerâmica estrutural, tais como, tijolos, blocos e telhas. Geralmente, a fabricação das peças cerâmicas compreende diversas etapas: exploração das jazidas, o tratamento prévio das matérias primas, a

homogeneização, a secagem e a queima. Na homogeneização, água é adicionada à argila para dar características de plasticidade e facilitar a moldagem das peças. Antes da queima torna-se necessário que seja feita a secagem da peça cerâmica para que a água acumulada nos poros seja retirada (SILVA et al., 2009).

A secagem é uma etapa bastante delicada e complexa no processo de fabricação de cerâmica. É comum nesta etapa ocorrerem defeitos de secagem nas peças cerâmicas que são perceptíveis somente após queima. A compreensão dos mecanismos envolvidos na secagem dos materiais cerâmicos permite, por exemplo, uma melhor compreensão dos defeitos e da forma de como evitá-los (VIEIRA et al., 2003).

Nos estudos de SILVA et al., (2013) foi reportado que durante a etapa de secagem dos materiais cerâmicos surgem elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do sólido. Com isso, simultaneamente, são geradas tensões térmicas e hídricas, que podem causar defeitos irreversíveis na peça produzida, diminuindo a produtividade do processo e aumentando custos operacionais. Neste contexto, é fundamental conhecer os efeitos da secagem e o seu controle, uma vez que estes alteram as propriedades físicas e químicas do produto, e tais alterações afetam sensivelmente o processo de transferência de calor e massa.

No controle da qualidade dos materiais cerâmicos é fundamental conhecer o teor de umidade e o tempo de secagem, uma vez que o transporte excessivo de massa e calor pode gerar tensões internas, comprometendo as propriedades dos produtos e, conseqüentemente, alterando a qualidade do produto final (AMORÓS et al., 2003; BARATI et al., 2003).

No ambiente onde acontece transferência de calor e/ou massa, deve-se ter um adequado controle das condições psicrométricas do ar, de modo a evitar danos estruturais irreversíveis, contribuindo para perdas de produtos e aumento de custos para as indústrias, provocando redução de empregos. Neste contexto, um processo não uniforme e com transporte excessivo de massa ou aporte calor, pode gerar deformações e trincas no produto, comprometendo assim, a qualidade do produto final, sendo estes os principais problemas a serem estudados na secagem de produtos cerâmicos (FRICKE (1981); ELIAS (1995); NASCIMENTO (2000a); NASCIMENTO (2000b); NASCIMENTO (2001a); KAWAGUTI (2004) e MARUGÁN-CRUZ et al., (2016).

A modelagem matemática é umas das ferramentas que pode-se utilizar para auxiliar o controle da qualidade de materiais cerâmicos (BRAGA et al., 2016). O emprego desta tecnologia pode permitir uma otimização de processos, contribuindo para evitar perdas e melhorar o desempenho na qualidade (ITAYA et al., 1997; MARCIÁN et al., 2014). Na literatura existem vários modelos matemáticos para secagem de materiais cerâmicos (BATISTA et al., 2009; CHEMKHI e ZAGROUBA, 2008; CHEMKHI e ZAGROUBA, 2005; SKANSI e TOMAS, 1995; SANDER et al., 2003; SU, 1997). Neste contexto, torna-se conveniente o estudo sobre a secagem em materiais cerâmicos, uma vez que pode-se ter um indicativo da qualidade dos materiais sobre determinadas condições, permitindo alterar os parâmetros para otimizar o processo e, conseqüentemente, favorecendo uma maior qualidade e produtividade.

Portanto, a presente pesquisa, teve como objetivo simular a distribuição de umidade e temperatura no interior de placas cerâmicas, bem como analisar resultados transientes unidimensionais variando o número de Biot. Além disso, será realizada uma análise crítica dos resultados com possíveis inconformidades em peças cerâmicas.

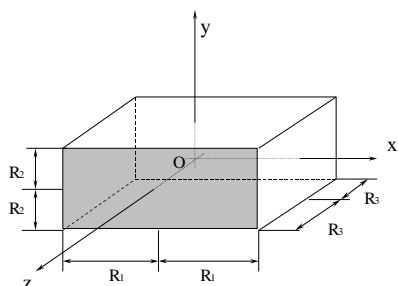
2. MATERIAIS E MÉTODOS

Modelagem do Processo de Difusão

Para descrever a transferência de calor e/ou massa no sólido com forma paralelepédica, as seguintes considerações são adotadas, no modelo matemático:

- as propriedades termo físicas são constantes, durante todo o processo de difusão;
- a geração interna de calor ou massa é desprezível;
- o sólido é homogêneo e isotrópico;
- a distribuição da propriedade (temperatura ou teor de umidade) é uniforme no início do processo;
- devido à forma do sólido, existe simetria no centro do mesmo;
- a condição de contorno na superfície do sólido é do tipo convectiva;
- O coeficiente de transferência da propriedade é constante.

A Figura 1 ilustra um sólido paralelepípedo de dimensões $2R_1 \times 2R_2 \times 2R_3$. Para este caso, a equação diferencial geral que descreve o fenômeno de difusão é da forma:



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

Figura 1. Configuração geométrica do problema físico.

Devido a forma do sólido, existe simetria nos planos $(x=0,y,z)$, $(x,y=0,z)$, $(x,y,z=0)$ e considera-se como volume de trabalho, apenas 1/8 do volume do sólido. As condições iniciais, de simetria (fluxo de Φ nulo) e de contorno para o problema são as seguintes:

- Condição inicial:

$$\Phi(x, y, z, t = 0) = \Phi_0 \quad \text{(B)}$$

- Condições de simetria:

$$\frac{\partial\Phi(x = 0, y, z, t)}{\partial x} = \frac{\partial\Phi(x, y = 0, z, t)}{\partial y} = \frac{\partial\Phi(x, y, z = 0, t)}{\partial z} = 0 \text{ em } t > 0 \quad \text{(C)}$$

- Condições de contorno na superfície:

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

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

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

Nestas equações, os subscritos \underline{o} e \underline{e} significam início e equilíbrio, respectivamente, e as variáveis \underline{x} , \underline{y} e \underline{z} representam as faces do paralelepípedo; $h_x=h_y=h_z=h$ corresponde ao coeficiente de transferência convectiva de calor ou massa.

Para tornar as Equações (B) - (F) mais gerais, considere as seguintes variáveis adimensionais:

$$\Phi^* = \frac{\Phi(x, y, z, t) - \Phi_e}{\Phi_o - \Phi_e}, \quad x^* = \frac{x}{R}, \quad y^* = \frac{y}{R}, \quad z^* = \frac{z}{R}, \quad t^* = \frac{\alpha t}{R^2}, \quad V^* = \frac{V}{R^3}, \quad Bi = \frac{hR}{\Psi} \quad \text{(G)}$$

Onde: $R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2}$, $\alpha = \Gamma_{\Phi}/\xi$ e $\Psi = k$ para calor e $\Psi = D$ para massa. Nestas equações, V é o volume do sólido e Bi é o número de Biot de transferência, cujos valores estão nos resultados e discussão.

Derivando-se estas equações e substituindo na Equação (A), obtém-se a equação geral tridimensional transiente na forma adimensional, dada por:

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial t^*} = \nabla^2 \Phi^* \quad \text{(H)}$$

Adimensionalmente, a condição inicial, de contorno e de simetria são as seguintes:

$$\Phi^*(x^*, y^*, z^*, 0) = 1 \quad \text{(H)}$$

$$-\frac{\partial \Phi^*}{\partial x^*} \Big|_e = Bi_x \Phi^* \quad ; \text{ para a face x.} \quad \text{(I)}$$

$$-\frac{\partial \Phi^*}{\partial y^*} \Big|_n = Bi_y \Phi^* \quad ; \text{ para a face y.} \quad \text{(J)}$$

$$-\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \Big|_f = Bi_z \Phi^* \quad ; \text{ para a face z.} \quad \text{(K)}$$

$$\frac{\partial \Phi^*(0, y^*, z^*, t^*)}{\partial x^*} = \frac{\partial \Phi^*(x^*, 0, z^*, t^*)}{\partial y^*} = \frac{\partial \Phi^*(x^*, y^*, 0, t^*)}{\partial z^*} = 0 \quad \text{(L)}$$

Rearranjando os termos da equação (M) e introduzindo os índices 1, 2 e 3 que referem-se às faces do sólido, perpendiculares aos eixos x , y e z , respectivamente, tem-se:

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

Sendo:

$$A_{n1} = \frac{2\text{Sen}(\beta_{n1}R_1)}{\beta_{n1}R_1 + \text{Sen}(\beta_{n1}R_1)\text{Cos}(\beta_{n1}R_1)} \quad (\text{M}_1)$$

$$A_{m2} = \frac{2\text{Sen}(\beta_{m2}R_2)}{\beta_{m2}R_2 + \text{Sen}(\beta_{m2}R_2)\text{Cos}(\beta_{m2}R_2)} \quad (\text{M}_2)$$

$$A_{k3} = \frac{2\text{Sen}(\beta_{k3}R_3)}{\beta_{k3}R_3 + \text{Sen}(\beta_{k3}R_3)\text{Cos}(\beta_{k3}R_3)} \quad (\text{M}_3)$$

E:

$$\text{Cotg}(\beta_{n1}R_1) = \frac{\beta_{n1}R_1}{Bi_1} \quad (\text{M}_4)$$

$$\text{Cotg}(\beta_{m2}R_2) = \frac{\beta_{m2}R_2}{Bi_2} \quad (\text{M}_5)$$

$$\text{Cotg}(\beta_{k3}R_3) = \frac{\beta_{k3}R_3}{Bi_3} \quad (\text{M}_6)$$

O valor media de Φ^* neste caso é:

$$\bar{\Phi}^* = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_{n1} B_{m2} B_{k3} e^{-[\beta_{n1}^2 + \beta_{m2}^2 + \beta_{k3}^2] \frac{\Gamma^{\Phi}}{\zeta} t} \quad (\text{N})$$

Onde:

$$B_{n1} = \frac{2Bi^2}{(\beta_{n1}R_1)^2 [Bi^2 + Bi + (\beta_{n1}R_1)^2]} \quad (\text{N}_1)$$

$$B_{m2} = \frac{2Bi^2}{(\beta_{m2}R_1)^2[Bi^2 + Bi + (\beta_{m2}R_2)^2]} \quad (N_2)$$

$$B_{k3} = \frac{2Bi^2}{(\beta_{k3}R_1)^2[Bi^2 + Bi + (\beta_{k3}R_1)^2]} \quad (N_3)$$

Nas equações (M) e (N), 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 $\Phi = M$.

Para demonstrar o mérito da metodologia apresentada, relativo ao uso e limitações, selecionou-se, para ilustrar, um problema de difusão de calor num paralelepípedo (tijolo refratário) de dimensões $(R_1 \times R_2 \times R_3)$ $0,100 \times 0,045 \times 0,025$ m³, para que uma solução exata pudesse ser obtida, e servir para validar a metodologia numérica, que será discutida nos itens posteriores.

A Norma Técnica EB-19 estabelece dois tamanhos $2R_1 \times 2R_2 \times 2R_3$ para tijolo cheio ou maciço: $(0,240 \pm 5) \times (0,115 \pm 2) \times (0,052 \pm 2)$ m³ e $(0,200 \pm 5) \times (0,045 \pm 2) \times (0,053 \pm 2)$ m³, mas nem sempre é obedecida pelas olarias (Bauer, 1994). As propriedades do material são: $\rho = 2100$ (kg/m³), $k = 1,13$ (W/mK) a 100°C, $c_p = 1064$ (J/KgK) e $h_c = 20$ W/m²K, o que permite determinar $\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = 4,48 \times 10^{-7}$ m²/s (Nascimento, 2002).

Para obtenção dos resultados analíticos, foram implementados dois programas computacionais, utilizando o software Mathematica, sendo um para obter os autovalores β_n e outro para obter Φ^* e $\bar{\Phi}^*$. Para determinação destes últimos parâmetros foi utilizado um número de 30^3 termos da série. Vale salientar, que, livros especializados em fenômenos de difusão apenas indicam como resolver o problema de difusão tridimensional transiente, usando separação de variáveis, contudo, nenhum resultado numérico é apresentado.

Solução Numérica

Neste trabalho foi usado o método dos volumes finites para discretizar as equações governantes. A Figura 2 representa o volume diferencial do domínio físico, onde os pontos nodais (W, E, N, S, F, T) são apresentados, bem como as dimensões e comprimento do volume de controle.

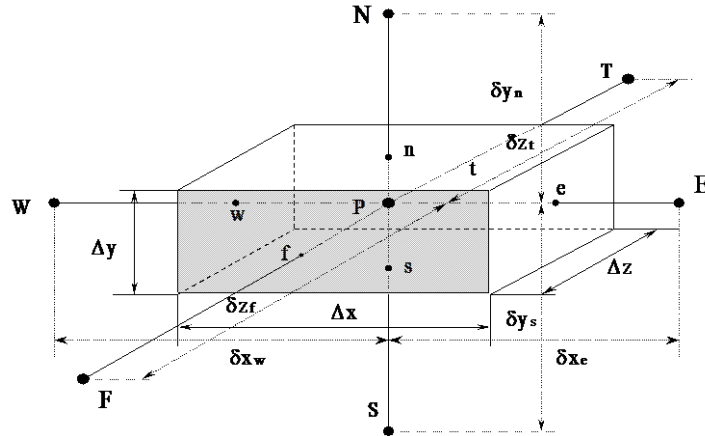


Figura 2. Volume de controle usado neste trabalho.

Foi assumido uma formulação totalmente implícita, onde todos os termos são estimados em $t+\Delta t$ na Eq(3), onde a integração do volume de controle da Figura 2 (que corresponde aos pontos internos do domínio), e também no tempo, (Maliska, 1995; Patankar, 1980). Os resultados da equação (1) podem ser escritos na forma linear, como:

$$A_P M^* P = A_E M^* E + A_W M^* W + A_N M^* N + A_S M^* S + A_T M^* T + A_F M^* F + B \quad (O)$$

Com:

$$A_E = \frac{\Delta y^* \Delta z^*}{(\delta x)_e^*} \quad A_W = \frac{\Delta y^* \Delta z^*}{(\delta x)_w^*} \quad A_N = \frac{\Delta z^* \Delta x^*}{(\delta y)_n^*} \quad A_S = \frac{\Delta z^* \Delta x^*}{(\delta y)_s^*}$$

$$A_T = \frac{\Delta x^* \Delta y^*}{(\delta z)_t^*} \quad A_F = \frac{\Delta x^* \Delta y^*}{(\delta z)_f^*} \quad A_P^0 = \frac{\Delta x^* \Delta y^* \Delta z^*}{\Delta t_m^*} \quad B = A_P^0 M^* P$$

A_E, A_N, A_F , são zero na fronteira do domínio.

$$A_P = \sum A_K + A_P^0 + \overline{SM} \quad (P)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para pontos nodais internos} \\ \frac{\Delta y^* \Delta z^*}{\left(\frac{1}{B_{im}} + \delta x_e^*\right)} & \text{para a superfície } x \end{cases}$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para pontos nodais internos} \\ \frac{\Delta x^* \Delta z^*}{\left(\frac{1}{B_{im}} + \delta y_n^*\right)} & \text{para a superfície } y \end{cases}$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para pontos nodais internos} \\ \frac{\Delta x^* \Delta y^*}{\left(\frac{1}{Bi_m} + \delta z_f^* \right)} & \text{para a superfície } z \end{cases}$$

O termo de geração SM está associado à transferência convectiva de massa na superfície do sólido.

O conjunto de equações são resolvidas iterativamente usando o método de Gauss-Seidel. O critério de convergência usado foi:

$$|M^{*n+1} - M^{*n}| \leq 10^{-8} \quad (Q)$$

Onde n representa as n iterações para cada tempo. Mais detalhes podem ser encontrados em Nascimento *et al.* (2001a-b) e Nascimento (2002).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados Unidimensional e Tridimensional

A solução analítica e numérica foi usada para a análise do problema sob o ponto de vista de transferência de calor ou massa. Os resultados foram obtidos de forma adimensional utilizando o programa computacional desenvolvido no ambiente Mathematica, considerando diferentes valores para o número de Biot, nos vários planos analisados.

Um decréscimo das variáveis adimensionais (temperatura ou massa) durante o processo transiente para os diversos instantes de tempo e em qualquer posição (z, y) ou (x, y) é observada, logo a temperatura do tijolo tende a igualar-se à temperatura do ambiente de secagem e a massa tende ao equilíbrio.

A Figura 2 evidencia de forma importante os gradientes de temperatura e/ou umidade em um meio poroso, ou seja, o seu aumento, caracterizará a possibilidade do risco de danos estruturais, tais como trincas e deformações devido ao aumento do número de Biot. Neste contexto, já de forma unidimensional se nota que deve-se controlar os processos de aquecimento e/ou resfriamento, bem como de secagem e/ou umificação.

A análise das Figuras 3 e 4 evidenciam mudanças significativas nos gradientes das variáveis adimensionais (temperatura ou massa) nos planos zy (x=0.000m) e xy (z=0.045m). Em uma análise comparativa entre as Figuras citadas, nota-se que os maiores gradientes no interior do sólido estão associados, em qualquer instante de tempo, ao aumento do número de Biot e, isto, fica também fortemente evidenciado na Figura 2, onde temos os gradientes de temperatura unidimensional em uma placa plana. Neste sentido, é evidente que a velocidade de aquecimento e de secagem não são uniformes por todo o tijolo e, nesse caso, se o processo não for controlado adequadamente, pode ocorrer intensas deformações não uniformes, onde a partir delas podem surgir danos estruturais que afetam a qualidade do produto final.

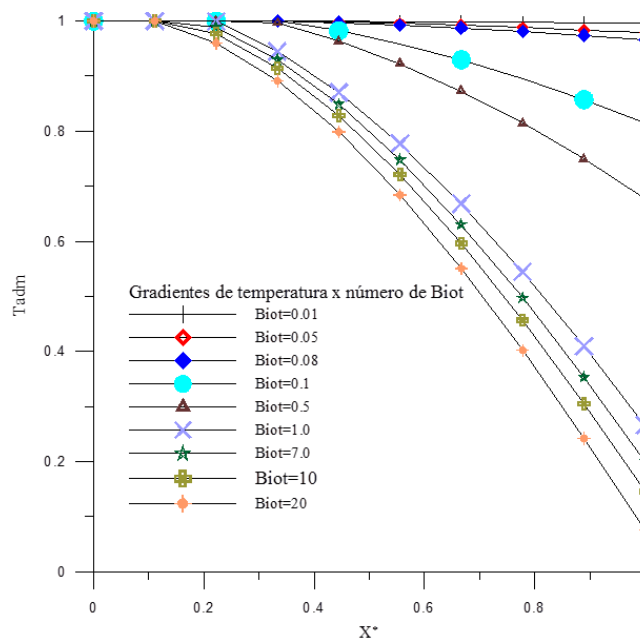


Figura 2. Distribuição dos gradientes de temperatura adimensional/umidade unidimensional em uma parede plana com convecção e número de Fourier = 0.1.

As Figuras 3 e 4 também evidenciam que as regiões de maior aquecimento ou maior perda de água, sob o aspecto da secagem, estão situadas nos vértices do sólido e particularmente no plano $z = 0.045\text{m}$. A região citada é a primeira a sofrer retração produzindo uma redução nas dimensões do tijolo e conseqüentemente do seu volume. Quando esta camada exterior se contrai, os poros do sólido também, dificultando a saída de água. A saída de água sendo restringida gera tensões de sentido contrário entre as camadas externa e interna, e quanto maiores forem essas tensões, maiores os riscos do aparecimento de deformações e trincas (FRICKE, 1981). As trincas ocorrem quando a tensão de cisalhamento excede a tensão de cisalhamento máxima do material, as maiores tensões (compressão) ocorrem na superfície do material que é uma região mais frágil. Já no interior do sólido existem tensões de tração (KEEY, 1992).

É de grande relevância uma secagem controlada anteriormente. Se a secagem não for uniforme, aparecerão distorções nas peças, mas se for muito lenta a produção tornar-se-á antieconômica. Para se ter uma secagem uniforme (gradientes de temperatura e umidade minimizados) é importante moderar adequadamente a intensidade da secagem. Essa moderação é realizada pelo controle das velocidades umidade relativa, temperatura do ar de secagem, forma do corpo, particularmente a relação área/volume e a porosidade do material. Para se ter uma ideia, argilas maleáveis perdem a secagem cerca de 5 a 8% do seu volume, enquanto que as menos maleáveis cerca de 3 a 5% dependendo da granulometria das partículas de argila. No entanto, bentonita, por exemplo, que é uma argila bastante maleável, de grão muito fino (baixa porosidade), chega a perder de 10 a 15% do seu volume. Uma discussão detalhada dos defeitos em materiais cerâmicos oriundos do processo de secagem pode ser encontrada na literatura (NASCIMENTO, 2002).

Do ponto de vista industrial, pode-se afirmar que o controle das propriedades termodinâmicas e velocidade do ar de secagem conduzem a um produto industrial de qualidade aceitável comercialmente.

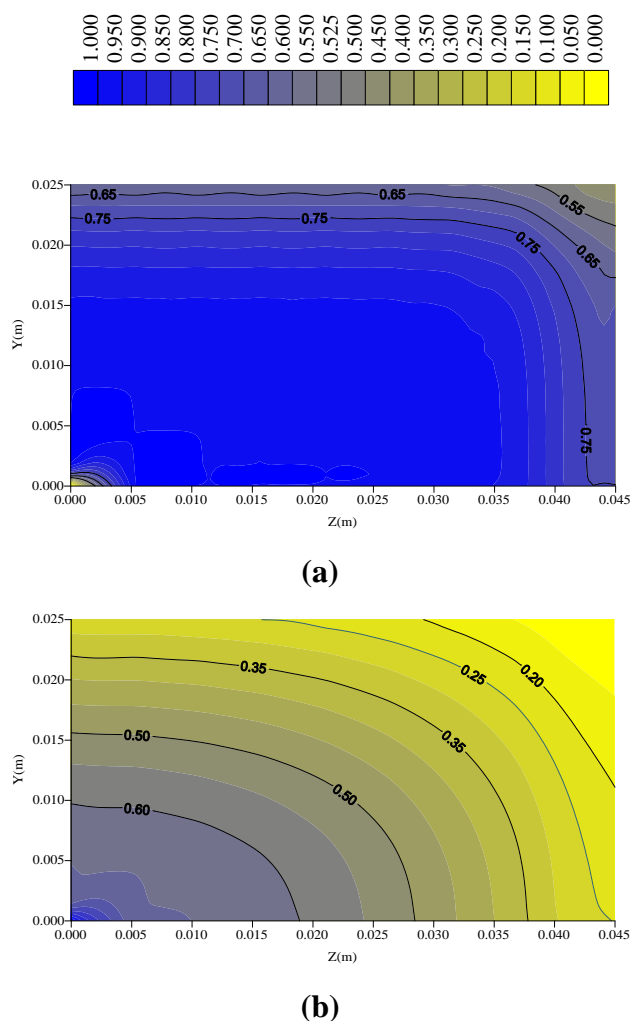


Figura 3. Perfis Bidimensionais Mostrando os Gradientes de temperatura e ou umidade adimensionais no plano $X = 0$ m, $Bi = 5,0$ nos tempos a) $t_c = 50s$, b) $t_c = 500s$, solução analítica e numérica.

O controle dos parâmetros de secagem gera como consequência o controle dos coeficientes de transferência convectiva de calor e massa na superfície do sólido.

De uma forma geral, como os resultados são adimensionais, estes também pode ser usado para estudos sob o ponto de vista de resfriamento e umidificação.

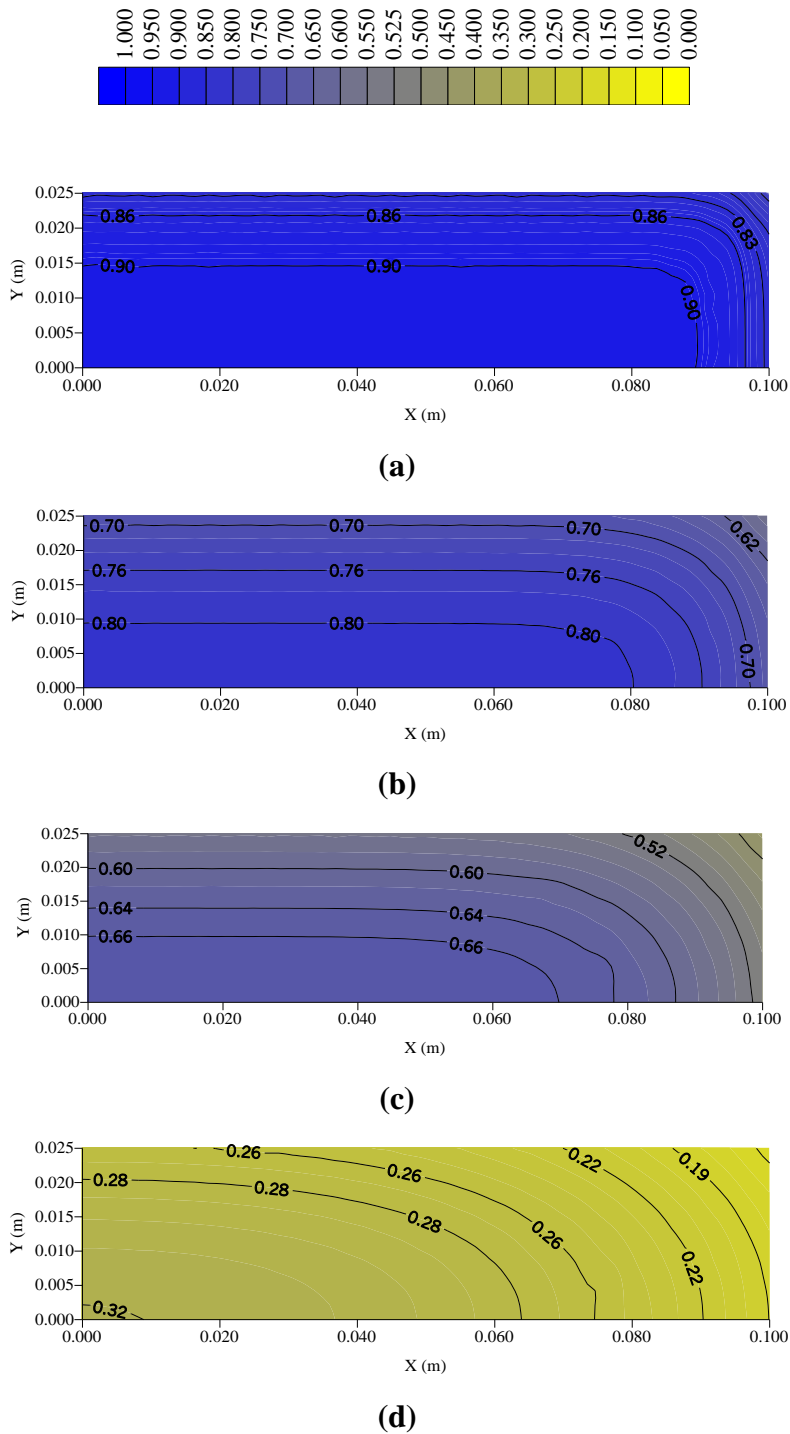


Figura 4. Perfis Bidimensionais Mostrando os Gradientes de Temperatura ou umidade adimensionais no Plano $Z=0,045m$, $Bi = 2,0$, nos Tempos $t_c = 50s$ a) $t_c = 50s$ b) $t_c = 200s$ c) $t_c = 500s$ d) $t_c = 1800s$, solução numérica e analítica.

4. CONCLUSÕES

- A forma do corpo interfere na cinética de secagem ou aquecimento, ou seja, quanto maior a relação área/volume, mais rápida será a secagem e como os resultados são adimensionais, servem para transferência de calor ou massa;

- O numero de Biot associado às condições convectivas (hm ou hc) e as propriedades de transporte, tais como condutividade térmica e difusividade térmica, interferem fortemente nos gradientes de temperatura e/ou umidade, por isto, é importante o controle do processo para evitar trincas e deformações no meio poroso;
- A solução tridimensional é original e contempla de forma tecnológica e científica os resultados unidimensionais;
- Temperaturas do ar de secagem elevadas e umidades relativas baixas implicam numa secagem mais rápida do material. Este efeito é por sua vez, mais acentuado do que os gerados pelas relações área/volume e teor de umidade inicial;
- Quando as temperaturas e umidades relativas do ambiente de secagem são as mesmas para corpos de prova com dimensões diferentes, o teor de umidade inicial e relação área/volume dominam a cinética de secagem;
- Maiores níveis do teor de umidade inicial implicam em maiores índices de retração.

REFERÊNCIAS

- AMORÓS, J. L., SÁNCHEZ, E., CANTAVELLA, V., JARQUE, J. C. Evolution of the mechanical strength of industrially dried ceramic tiles during storage. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 23, p. 1839-1845, 2003.
- BARATI, A., KOKABI, M., FAMILI, M. H. N. Drying of gelcast ceramic parts via the liquid casting method. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 23, p. 2265-2272, 2003.
- BATISTA, V. R., NASCIMENTO, J. J. S., LIMA, A. G. B. Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. *Matéria (Rio J.)*, v.14, p. 1088-1100, 2009.
- BAUER, L. A. F. *Materiais de Construção*. 2 ed. Rio de Janeiro. Editora LTC, 1994; 935p.
- BRAGA, W. A., SANTOS, M. W. L. C., SALES, J. C. Qualidade na indústria de cerâmica vermelha: medidas e alternativas para o controle dimensional. *Cerâmica Industrial*, v. 20, p. 40-43, 2016.
- CHEMKHI, S.; ZAGROUBA, F. Development of A Darcy-flow model applied to simulate the drying of shrinking media. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 25, p. 503-514, 2008.
- CHEMKHI, S.; ZAGROUBA, F. Water diffusion coefficient in clay material from drying data. *Desalination*, v. 185, p. 491-498, 2005.
- ELIAS, X.A. *Fabricação de Materiais Cerâmicos*. Barcelona-Espanha, 1995, 250p.
- FRICKE, J. A, 1981, "Cerâmica, editora Presença Ltda, Lisboa", 152p.
- ITAYA, Y., TANIGUCHI, S., HASATANI, M. A numerical study of transient deformation and stress behavior of a clays lab during drying. *Drying Technology*, v.15, p. 1-21, 1997.
- KAWAGUTI, W. M. Estudo do comportamento térmico de fornos intermitentes tipo "paulistinha" utilizados na indústria de cerâmica vermelha. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina – SC, 2004.
- KEYY, R. B. 1992, *Drying of loose and particulate materials*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 502p.

MARUGÁN-CRUZ, C.; FLORES, O.; SANTANA, D.; VILLALBA, M.G. Heat transfer and thermal stress in a circular tube with a non-uniform heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 96, pp 256-266.

MARCIÁN, P., VALÁSEK, J., HRSTKA, M., MAJER, Z., SEVECEK, O., PROFANT, T., DLOUHY, I., FLORIAN, Z. Computational modeling of porous ceramics with bioactive layer. *Key Engineering Materials*, v. 592-593, p. 378-381, 2014.

MORAIS, M. D. P., MACEDO, R. S., RAPOSO, C. M. O. Preparação e caracterização de sistemas chamote/argila visando o reaproveitamento de descartes industriais. *Cerâmica*, v. 61, p. 206-212, 2015.

MUSIELAK, G. Possibility of clay damage during drying. *Drying Technology*, v. 19, p. 1645-1659, 2007.

NASCIMENTO, J. J. S., 2002, "Fenômenos de Difusão em Sólidos Paralelepípedos. Estudo de Caso: Secagem de Materiais Cerâmicos". João Pessoa: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba – Campus I. 181p. Tese (Doutorado).

NASCIMENTO, J. J. S.; Belo F.A.; Lima, A. G. B.; Pontes, L. R. A., 2000^a, "Fenômenos de Difusão Transiente em Sólidos Paralelepípedos". Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), CD ROM, Natal, Brasil.

NASCIMENTO, J.J.S., BELO, F.A., LIMA, A.G.B., "Simultaneous mass transport and shrinkage during drying of solid parallelepiped: a numerical study", In: Proceedings of the Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, pp. 1-10, Campinas, SP, Novembro 2001a.

NASCIMENTO, J. J. S.; Belo F.A.; Lima, A. G. B., 2000b, "Solução Numérica para o Problema de Difusão Transiente em Sólidos Paralelepípedos", Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais (CBECIMAT), CD ROM, São Paulo, SP, Brasil.

NASCIMENTO, J. J. S., Belo F.A., Lima, A. G. B., Neves, G. A., 2003, "Drying of Ceramics Including Shrinkage: Numerical and Experimental Study", 3rd International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Banff-Canadá.

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

RAMOS, S. O., MACEDO, R. S., CARTAXO, J. M., MENEZES, R. R., NAVARRO, L. N. L., NEVES, G. A. Caracterização de argilas usadas para cerâmica estrutural. *REMAP*, v. 5, p. 65-70, 2010.

SANDER, A., SKANSI, D., BOLF, N. Heat and mass transfer models in convection drying of clays. *Ceramics International*, v. 29, p. 641-653, 2003.

SILVA, A. A., NASCIMENTO, J. J. S., LIMA, A. G. B. Estudo analítico de secagem de placas cerâmicas usando o método integral baseado em Galerkin e condição de contorno de Dirichlet. *REMAP*, v. 4, p. 48-55, 2009.

SILVA, L. D., SILVA, W. P., SILVA, C. M. D. P., FARIAS, V. S. O. Descrição da secagem de placas cerâmicas por meio de um modelo de difusão. *Cerâmica*, v. 59, p. 409-416, 2013.

SKANSI, D.; TOMAS, S. Microwave drying kinetics of a clay-plate. *Ceramics International*, v. 21, p. 207-211, 1995.

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

VIEIRA, C. M. F., FEITOSA, H. S., MONTEIRO, S. N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot. *Cerâmica Industrial*, v. 8, p. 42-46, 2003.