

Descrição da secagem de placas cerâmicas por meio de um modelo de difusão

(Description of drying ceramic plates by a diffusion model)

L. D. da Silva, W. P. da Silva, C. M. D. P. S., Silva, V. S. O. Farias

Grupo Aquisição e Tratamento de Dados Experimentais, UAF, CCT, Universidade Federal de Campina Grande, R. Aprígio Veloso 882, Campina Grande, PB 58429-900

laerson.duarte@gmail.com, wiltonps@uol.com.br, cleidedps@uol.com.br, vera-solange@uol.com.br

Resumo

O objetivo deste trabalho foi estudar o transporte de água, através do modelo da difusão líquida, em placas cerâmicas que podem ser usadas como revestimento de alvenaria, bem como apresentar um algoritmo de otimização baseado no método inverso. Para atingir os objetivos o algoritmo apresentado foi acoplado à solução analítica da equação de difusão, possibilitando determinar os parâmetros de processo a partir dos dados experimentais da secagem das placas. A condição de contorno empregada foi a de terceiro tipo e a geometria considerada foi a de um paralelepípedo. Uma vez determinados os parâmetros de processo, a cinética de secagem das placas cerâmicas foi simulada para cada temperatura. Os revestimentos cerâmicos foram moldados com argila vermelha, que também é usada na fabricação de tijolos e telhas. Amostras do produto com teor de umidade inicial em ~0,110 (bs) foram colocadas dentro de uma estufa a 50,0, 60,0, 70,0 e 90,0 °C, e os dados da cinética de secagem foram coletados. A análise dos resultados obtidos, por meio dos gráficos das cinéticas de secagem e dos indicadores estatísticos, permite concluir que o modelo de difusão líquida descreve de forma satisfatória a cinética de secagem do produto. Os valores obtidos para o coeficiente de transferência convectivo de massa e para a difusividade efetiva da água foram consistentes com valores disponíveis.

Palavras-chave: coeficiente de transferência convectivo, difusividade efetiva de massa, placas cerâmicas, otimização.

Abstract

This work aimed to study the water transfer in ceramic plates that can be used as coatings masonry by a liquid diffusion model, as well as to present an optimization algorithm based on the inverse method. The presented algorithm was coupled to the analytical solution of the diffusion equation, enabling to determine the process parameters from the experimental data of drying the plates. The boundary condition employed was of the third kind and the geometry considered was a parallelepiped. Once the process parameters were determined, the drying kinetics of ceramic plates was simulated for each temperature. The ceramic plates were molded with red clay, which is also used in making bricks and tiles. Samples of the product with initial moisture content (dry basis) of 0.110 kg were placed into a kiln at 50.0, 60.0, 70.0 and 90.0 °C and the data of the drying kinetics were obtained. The analysis of the obtained results (statistical indicators and graphics) makes it possible to affirm that the diffusive model adequately describe the drying kinetics. The values obtained for the convective mass transfer coefficient and for the effective water diffusivity were consistent with values reported.

Keywords: convective mass transfer coefficient, effective mass diffusivity, ceramic plates, optimization.

INTRODUÇÃO

Uma atividade industrial importante no mundo em geral, e em particular no Brasil, consiste na produção de materiais cerâmicos, que são compostos basicamente por argila. Os materiais cerâmicos têm ampla utilização na construção civil e são fabricados a partir de matérias-primas classificadas em naturais e sintéticas. Utilizando-se de um processamento adequado, suas propriedades químicas e fases cristalinas podem ser alteradas. Para a fabricação de peças cerâmicas, é fundamental observar as seguintes etapas: exploração das jazidas, tratamento prévio das matérias-primas, homogeneização, secagem e queima [1-3]. Na homogeneização, água é adicionada à argila para dar características de plasticidade e facilitar a moldagem das peças.

A secagem é o processo responsável pela retirada dessa

água, durante a fabricação de produtos cerâmicos. Esta etapa é uma das mais essenciais do processo produtivo, tanto do ponto de vista econômico quanto da qualidade final da peça produzida. Durante essa etapa, 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 [4-7]. Quando a produção de peças cerâmicas acontece em escala industrial, uma variável que deve ser levada em consideração refere-se ao consumo da energia gasta ao longo do processo produtivo. O consumo de energia térmica e elétrica representa, atualmente, uma grande parcela do custo total de produção dessas indústrias, estando a secagem entre as etapas que mais consomem energia [8]. 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 [9, 10]. Um setor dessa área de produção que tem merecido especial atenção por parte de pesquisadores, face ao amplo interesse demonstrado pelo mercado e fabricantes, é aquela referente aos produtos de revestimento cerâmico. A classificação dos revestimentos cerâmicos é feita de acordo com a adequação ao local de aplicação do produto. Para pisos, por exemplo, os revestimentos devem possuir baixa porosidade, elevada resistência mecânica e baixa absorção de água, enquanto que os revestimentos usados em paredes necessitam de alta porosidade para garantir baixa retração de queima, alta estabilidade dimensional e facilidade de instalação [11]. Assim, torna-se importante avaliar as propriedades físico-mecânicas, bem como a influência da composição das matérias-primas, envolvendo variáveis de processo no estudo de formulações para a produção de revestimentos cerâmicos [12-16].

O controle das dimensões e formato dos revestimentos cerâmicos é fundamental para se garantir a qualidade do produto. Produtos que apresentam significativas variações dimensionais e/ou desvios da forma podem prejudicar os efeitos estéticos obtidos com as peças assentadas [17]. A obtenção de produtos capazes de atender os requisitos geométricos está diretamente ligada às características do processo de fabricação e as etapas que se sucedem ao processo de fabricação. Levando em consideração que as superfícies das prensas estejam perfeitamente ajustadas e que não tenham sofrido desgastes, as peças recém-conformadas possuem o formato mais regular possível. A partir de então, as sucessivas etapas do processo de fabricação não devem alterar de maneira significativa o formato das peças para que o produto acabado continue apresentando o formato desejado.

Vários modelos de secagem estão disponíveis na literatura e, em particular para materiais cerâmicos, podem ser citados os seguintes: modelos empíricos [18, 19], modelos baseados na lei de Darcy [20, 21], e modelos de difusão [19, 22-24]. Para que um modelo difusivo possa ser utilizado na descrição da cinética de secagem de um produto, a equação de difusão deve ser resolvida. A solução da equação de difusão, em diversas situações de interesse, requer muitas vezes a necessidade de se estabelecer certas hipóteses na descrição do processo físico. Uma delas está relacionada com as condições de contorno, que devem ser identificadas na descrição do processo de secagem. Embora o uso de condições de contorno do terceiro tipo seja mais comum, alguns trabalhos usando condições de contorno do primeiro tipo são também encontrados na literatura [23]. Em adição a isto, a geometria do sólido também deve ser definida. São reportados na literatura alguns trabalhos que usam modelos 1D [23, 25], modelos 2D [1] e modelos 3D [3, 10, 26]. Outro aspecto a ser considerado na solução da equação de difusão diz respeito aos parâmetros termo-físicos. Em muitas situações de interesse, eles estão disponíveis na literatura [20-22]. Se tais parâmetros não são conhecidos, eles devem ser determinados por algum meio, como através da otimização, o que permite realizar a simulação do processo de secagem [27-30].

O principal objetivo deste trabalho é apresentar a solução analítica da equação de difusão e também um algoritmo de otimização a ser acoplado a esta solução, de tal forma que os parâmetros de transporte possam ser determinados a partir de um conjunto de dados experimentais da cinética de secagem de placas cerâmicas de revestimento. Uma vez determinados os parâmetros de processo, a secagem pôde ser simulada e a evolução da distribuição do teor de umidade no interior das peças foi acompanhada para vários instantes de tempo.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho serão usados modelos de difusão para descrever a secagem de placas cerâmicas que podem ser usadas como revestimento de alvenaria. Estes modelos são tridimensionais com condições de contorno do terceiro tipo e trata a difusividade como um parâmetro constante.

Equação de difusão: em geral, a equação de difusão pode ser escrita da seguinte forma [31, 32]:

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

na qual M é o teor de umidade em base seca, t é o tempo, e D é a difusividade efetiva de massa. Para resolver a equação de difusão em coordenadas cartesianas, a equação A deve ser reescrita como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (B)$$

em que x , y , z são as coordenadas cartesianas de posição.

A equação B pode ser resolvida numericamente e, sob certas condições, analiticamente. Neste artigo, a solução analítica será usada para descrever a difusão de umidade em sólidos porosos na forma de paralelepípedos.

Hipóteses para obtenção da solução analítica: no presente trabalho, as peças cerâmicas a serem estudadas

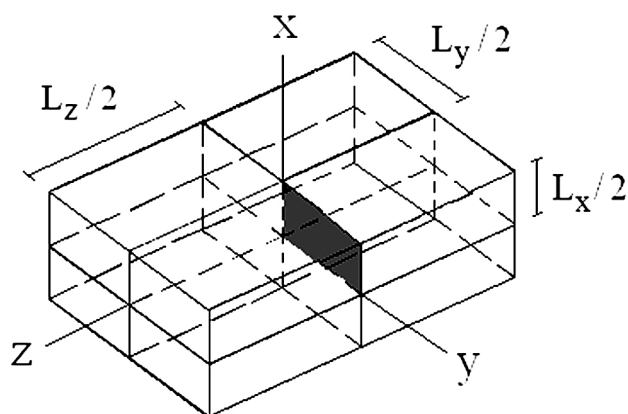


Figura 1: Paralelepípedo destacando um plano vertical xy , na posição $z = 0$, onde a distribuição de água será examinada.

[Figure 1: Parallelepiped highlighting a vertical plane xy position $z = 0$, where the distribution of water will be examined.]

devem ser consideradas na sua geometria real, ou seja, devem apresentar a forma de um paralelepípedo, como mostrado na Fig. 1.

As hipóteses para obtenção da solução analítica da equação (B) são: difusão líquida é o único mecanismo de transporte de água no interior do sólido; a distribuição de umidade inicial deve ser uniforme; as dimensões do sólido não variam durante o processo de difusão; o coeficiente de transferência convectiva de massa h é constante durante a difusão de água; a difusividade efetiva da água D não varia durante o processo de difusão; as placas cerâmicas de revestimento são consideradas como peças homogêneas e isotrópicas.

Solução analítica para condição de contorno de terceiro tipo: a condição de contorno convectiva é obtida impondo a igualdade entre o fluxo difusivo no interior da superfície e o fluxo convectivo externo nas vizinhanças da mesma superfície. Para um paralelepípedo, essa imposição resulta em:

$$-D \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm L_x/2} = h \left(M(x, y, z, t) \Big|_{x=\pm L_x/2} - M_{eq} \right)$$

$$-D \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=\pm L_y/2} = h \left(M(x, y, z, t) \Big|_{y=\pm L_y/2} - M_{eq} \right)$$

(C 1-3)

e

$$-D \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=\pm L_z/2} = h \left(M(x, y, z, t) \Big|_{z=\pm L_z/2} - M_{eq} \right)$$

em que h é o coeficiente de transferência convectivo de massa, $M(x, y, z, t)$ é o teor de umidade na posição (x, y, z) dentro do paralelepípedo no instante t , M_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio e L_x, L_y e L_z são os comprimentos das arestas do paralelepípedo ao longo de x, y e z , respectivamente.

Para um paralelepípedo homogêneo com teor de umidade inicial uniforme M_0 e condição de contorno definida pelas equações (C 1-3), a solução analítica $M(x, y, z, t)$ da equação (B) é obtida por separação de variáveis [31, 32]:

$$M(x, y, z, t) = M_{eq} - (M_{eq} - M_0) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n A_m A_k \cos\left(\mu_n \frac{x}{L_x/2}\right) \times \cos\left(\mu_m \frac{y}{L_y/2}\right) \times \cos\left(\mu_k \frac{z}{L_z/2}\right) \exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_k^2}{(L_z/2)^2}\right)Dt\right]$$

(D)

em que

$$A_j = \frac{4 \sin \mu_j}{2\mu_j + \sin(2\mu_j)} \tag{E}$$

na qual μ_j são as raízes da equação característica para a parede infinita, dada por:

$$\cot \mu_j = \frac{\mu_j}{Bi} \tag{F}$$

O parâmetro Bi (número de Biot) é definido como

$$Bi = \frac{hL/2}{D} \tag{G}$$

na qual L é um comprimento característico.

Na equação D verifica-se que o valor do teor de umidade pode ser obtido para qualquer posição (x, y, z) em qualquer instante t , isto é, pode-se conhecer o seu perfil no interior do corpo. No entanto, em muitos casos de interesse, necessitam-se conhecer o valor do teor de umidade no corpo inteiro, ao longo do processo. Para esses casos, a expressão para o teor de umidade médio no tempo t pode ser escrito como:

$$\bar{M}(t) = \frac{1}{V} \int M(x, y, z, t) dV \tag{H}$$

na qual V é o volume do paralelepípedo.

Substituindo a equação D na equação H e realizando-se a integração, o teor de umidade médio, $\bar{M}(t)$, no tempo t , é dado por:

$$\bar{M}(t) = M_{eq} - (M_{eq} - M_0) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_n B_m B_k \exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_k^2}{(L_z/2)^2}\right)Dt\right]$$

(I)

na qual os coeficientes B_n, B_m e B_k são dados por:

$$B_j = \frac{2Bi^2}{\mu_j^2 (Bi^2 + Bi + \mu_j^2)} \tag{J}$$

Para a situação física analisada, é razoável admitir o mesmo valor de h em todas as faces do paralelepípedo, e esta suposição resulta em:

$$Bi_1 = \frac{h(L_x/2)}{D}$$

$$Bi_2 = Bi_1 \frac{L_y}{L_x}$$

$$Bi_3 = Bi_1 \frac{L_z}{L_x}$$

(K-13)

A equação F é uma equação transcendental que pode ser reescrita como:

$$\mu_j \sin \mu_j - Bi \cos \mu_j = 0 \tag{L}$$

A equação L pode ser resolvida numericamente para qualquer número de Biot estipulado. Para isto, um programa auxiliar foi escrito em Fortran, e as 25 primeiras raízes da equação foram calculadas para 469 valores específicos dos

Tabela I - Algumas raízes da equação característica para vários números de Biot.
 [Table I - Some roots of the characteristic equation for various Biot numbers.]

Bi	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6
0,001	0,031618	3,14191	6,28334	9,42488	12,5665	15,7080
0,400	0,593242	3,26355	6,34613	9,46700	12,5981	15,7334
1,000	0,860334	3,42562	6,43730	9,52933	12,6453	15,7713
10,00	1,42887	4,30580	7,22811	10,2003	13,2142	16,2594
200,0	1,56298	4,68895	7,81493	10,9409	14,0669	17,1930

números de Biot que variaram desde $Bi = 0$ (que corresponde a uma resistência infinita para o fluxo de água na superfície) até $Bi = 200$ (que praticamente corresponde à condição de contorno de equilíbrio). Como exemplo, as primeiras seis raízes da equação L, para alguns números de Biot, são apresentadas na Tabela I.

Otimização: Determinação de parâmetros: Para um conjunto de dados experimentais, as soluções analíticas apresentadas podem ser usadas para determinar os parâmetros de processo, se essas soluções forem acopladas a um otimizador. Neste caso, os parâmetros podem ser determinados pelo método inverso. Para tal, uma função objetivo é definida e, neste trabalho, o indicador estatístico qui-quadrado será utilizado para este fim (ver por exemplo [33]).

Otimizador para soluções analíticas com condição de contorno do terceiro tipo: o otimizador acoplado à solução analítica referente a um paralelepípedo foi usado neste trabalho para a determinação de parâmetros termofísicos [29]. Tais parâmetros são a difusividade efetiva e o coeficiente de transferência convectivo de massa. Assim, a função objetivo a ser minimizada é dada pelo qui-quadrado referente ao ajuste da curva simulada aos dados experimentais [34, 35]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\overline{M}_i^{\text{exp}} - \overline{M}_i^{\text{ana}}(D, Bi_1)]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (M)$$

na qual N_p é o número de dados experimentais, $1/\sigma_i^2$ é o peso estatístico referente ao i -ésimo ponto experimental sendo que, na ausência de informações, em geral, tais pesos são feitos iguais à unidade. Vale salientar que σ_i é o desvio padrão do valor médio de M_i . Deve ser observado que, para um número de Biot especificado, o qui-quadrado depende de um único parâmetro de processo: a difusividade efetiva. Assim, para um conjunto de dados experimentais, para cada número de Biot especificado, um “D” ótimo pode ser determinado através da minimização do qui-quadrado, usado como função objetivo. Com Bi_1 especificado, a equação M dá o qui-quadrado em função do valor da difusividade, que é um dos parâmetros que se deseja determinar. Para a determinação de um primeiro intervalo que contenha o valor de D referente ao menor qui-quadrado, inicialmente pode-se atribuir um valor próximo de zero para D, que é substituído na equação I, dada com uma certa quantidade de termos (no presente trabalho, dezesseis termos para cada somatório).

Então, $\overline{M}_i^{\text{ana}}$ pode ser calculado, o que possibilita determinar χ^2 através da equação M. No otimizador desenvolvido [29], este primeiro valor para D é igual a 1×10^{-20} . Então, o valor de D é dobrado, e um novo χ^2 é calculado. O novo qui-quadrado é comparado com o valor anterior. Se o novo valor for menor, D é dobrado novamente, e outro valor de χ^2 é calculado, seguindo-se da comparação com o valor anterior de χ^2 . Este procedimento é repetido até que o último calculado seja maior que o valor anterior. Dessa forma, o último e o antepenúltimo valores de D definem um intervalo grosseiro que contém o ponto de mínimo para χ^2 . Subdividindo este primeiro intervalo determinado para D em n valores para a difusividade, pode-se determinar n novos valores de χ^2 correspondentes aos novos valores de D estipulados neste intervalo. Desta forma, pode-se determinar um novo mínimo para χ^2 , mais refinado, e o processo pela busca por D referente ao χ^2 mínimo pode prosseguir até que um critério de convergência seja satisfeito. O procedimento descrito anteriormente pode ser repetido para todos os 469 números de Biot que cobrem todo o domínio de 0 até 200. Após a varredura de todos os números de Biot (Bi_1), é feita a identificação do menor qui-quadrado entre todos os mínimos determinados, o que possibilita identificar o número de Biot adequado ao processo difusivo. Para números de Biot referente às dimensões L_y e L_z , as raízes da equação característica foram calculadas por interpolação linear, usando os valores calculados para Bi_1 .

Dados experimentais da secagem de placas cerâmicas de revestimento: a matéria prima usada neste trabalho foi argila vermelha para placas cerâmicas, oriunda da cidade de Parelhas, interior do Rio Grande do Norte. Os componentes químicos da argila e os seus respectivos percentuais de composição são apresentados na Tabela II. O material argiloso apresenta uma composição típica, sendo constituída principalmente de sílica (41,80%) e alumínio (22,09%), possuindo outros constituintes com percentuais menores como, por exemplo, K_2O (2,69%). Os percentuais de Cálcio e Magnésio que aparecem na argila são 1,25 e 3,79%, respectivamente. O teor de Óxido de Ferro (Fe_2O_3) presente na matéria prima apresenta um percentual de 10,43%, o que é uma composição típica para classificar a amostra como argila vermelha.

A curva de distribuição granulométrica pode ser observada na Fig. 2, indicando que a matéria-prima constituinte do material apresenta uma faixa de distribuição granulométrica variando de 0,1 a 100 μm , com D_{10} de 1,78 μm , D_{50} de 11,69 μm , D_{90} de

Tabela II - Composição química da argila.
[Table II - Chemical composition of clay.]

Componentes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	P.F.*	Outros
Composição química (%)	41,80	22,09	10,43	3,79	2,69	1,25	1,00	16,32	0,63

*Perda ao Fogo

44,04 µm, e um diâmetro médio de 17,90 µm.

Inicialmente a amostra foi seca a 110 °C, desintegrada em

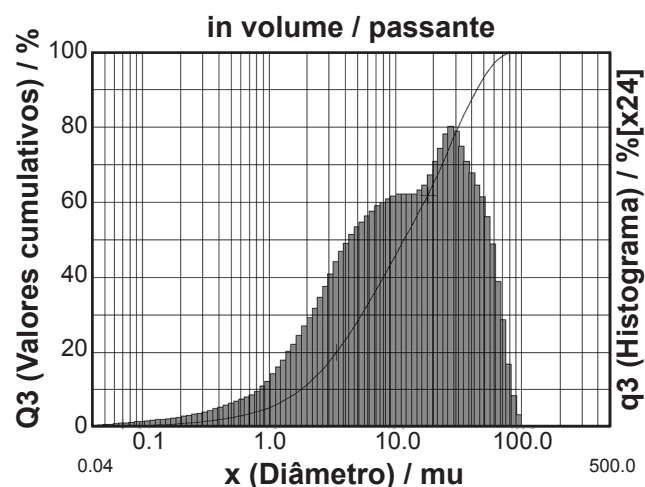


Figura 2: Distribuição granulométrica da argila e curva cumulativa.
[Figure 2: Particle size distribution of clay.]

moinho de bolas e peneirada em malha 80 (180 µm). O pó de cerâmica foi umidificado uniformemente com uma quantidade de água próxima de 10% e permaneceu em repouso por 24 h para melhorar a plasticidade. A massa plástica foi processada por extrusão usando uma extrusora de laboratório Verdé. Após a moldagem na forma de placas cerâmicas para revestimento, as peças foram submetidas ao processo de secagem. Amostras em duplicata foram colocadas em uma estufa. A secagem foi a 50,0, 60,0, 70,0 e 90,0 °C, com velocidade média do fluxo de ar 0,06 m.s⁻¹. A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram, respectivamente, 26 °C e 75%, em média. A partir do momento em que as amostras foram colocadas na estufa, as massas foram pesadas e obtidas suas dimensões em intervalos de tempo que variaram de 4 a 5 min no início da secagem até cerca de 1 ou 2 h no final do processo. As variações no intervalo de tempo foram diferentes para cada temperatura de secagem. Para mensurar as dimensões das placas, foi utilizado um paquímetro com uma resolução de 0,01 mm e fundo de escala 150 mm. As medidas de massa

foram realizadas com uma balança digital. Este procedimento aconteceu até que a massa atingisse o seu valor de equilíbrio. Ao final de cada secagem a temperatura da estufa foi regulada em 105,0 °C e os corpos de prova lá permaneceram por 24 h, possibilitando a determinação da massa seca. Convém ressaltar que não foram observadas trincas ou outros defeitos nas placas de revestimento em nenhuma temperatura de secagem. Dados experimentais sobre a cinética de secagem estão resumidos na Tabela III.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo de otimização descrito neste trabalho foi utilizado para ajustar a solução analítica da equação de difusão, dada pela equação A, para os quatro conjuntos de dados experimentais. Para cada conjunto, são determinados 469 valores de qui-quadrado (χ^2) correspondentes aos 469 números de Biot (Bi_1) especificados de 0 até 200. Após uma inspeção nesses resultados, pode-se encontrar a região em que o menor qui-quadrado está contido e o correspondente número de Biot. Esta relação pode ser observada, para cada temperatura de secagem, na Fig. 3.

Na Tabela IV estão resumidos os principais resultados para os parâmetros ótimos e indicadores estatísticos obtidos para as quatro temperaturas usadas no processo de otimização, ao se considerar constantes o volume das placas cerâmicas de revestimento e os parâmetros de transporte.

Utilizando-se os resultados obtidos para D e h através do processo de otimização, foi feita a simulação da cinética para todas as temperaturas de secagem, cujos resultados são apresentados na Fig. 4. Na figura mencionada constam: os pontos experimentais, a simulação da cinética de secagem, a expressão para a difusividade efetiva, o valor do coeficiente de transferência convectivo de massa e os indicadores estatísticos. Através de uma inspeção nos gráficos apresentados na Fig. 4, é possível afirmar que o modelo empregado para descrever o transporte de água nas placas cerâmicas pode ser considerado satisfatório face à razoável concordância entre as curvas simuladas e os dados experimentais.

Tabela III - Teor de umidade inicial (M_0), de equilíbrio (M_{eq}), e dimensões das placas de revestimento.
[Table III - Initial moisture content (M_0) balance (M_{eq}), and dimensions of the covering plates.]

T (°C)	M_i (bs)	M_{eq} (bs)	L_x (10 ⁻³ m)	L_y (10 ⁻³ m)	L_z (10 ⁻³ m)
50,0	0,2272	0,0162	6,05	29,38	77,50
60,0	0,2286	0,0105	6,02	24,38	73,75
70,0	0,2330	0,0077	5,96	26,24	77,13
90,0	0,2316	0,0024	5,92	26,94	77,86

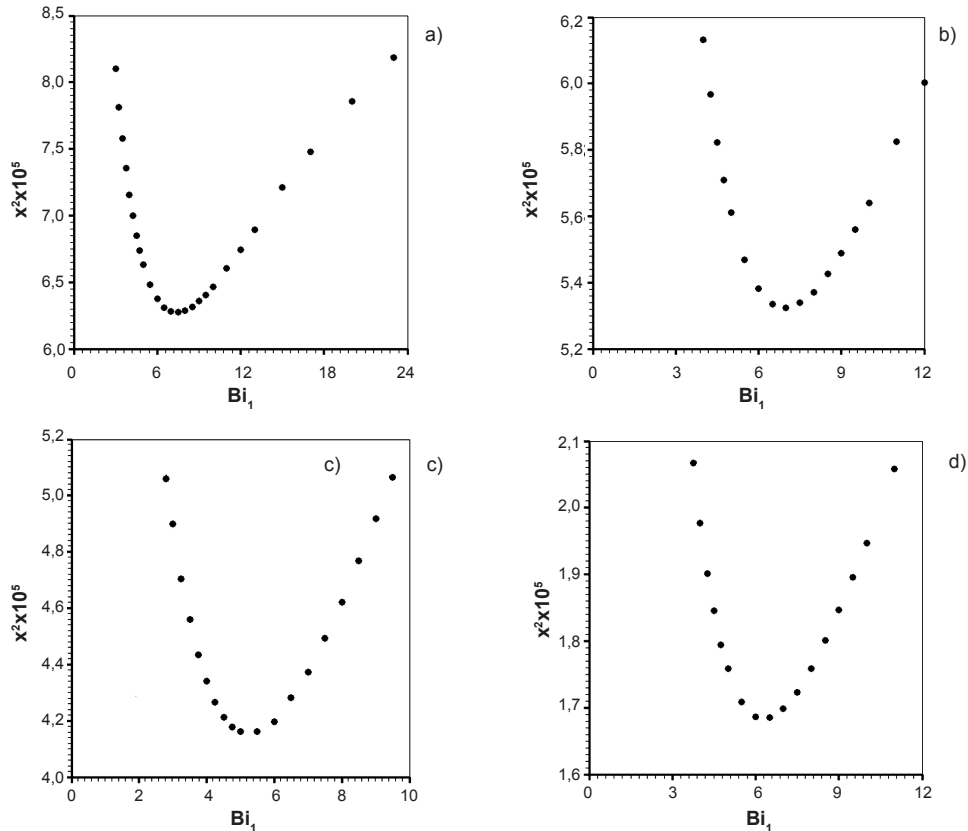


Figura 3: Qui-quadrado versus número de Biot nas vizinhanças do ponto ótimo, para: (a) $T = 50,0$ °C; (b) $T = 60,0$ °C; (c) $T = 70,0$ °C; (d) $T = 90,0$ °C.

[Figure 3: Chi-square versus Biot number in the neighborhood of the optimum point for: (a) $T = 50.0$ °C, (b) $T = 60.0$ °C, (c) $T = 70.0$ °C, (d) $T = 90.0$ °C.]

Por outro lado, a superposição das curvas que representam as cinéticas de secagem para as quatro temperaturas investigadas pode ser observada na Fig. 5, através da qual, pode-se concluir que, como esperado, as placas cerâmicas secam mais rapidamente à medida que a temperatura do ar de secagem cresce.

A obtenção de informações sobre como o teor de umidade está distribuído no interior e no contorno do sólido é importante, porque essas diferenças geram tensões que podem provocar danos ao produto, tais como trincas, fissuras ou deformações. Assim, foi analisada a distribuição espacial do teor de umidade no plano destacado na Fig. 1, para cada temperatura de secagem, em instantes de tempo previamente escolhidos. Para a temperatura de secagem de $50,0$ °C, a evolução temporal da distribuição espacial do teor de umidade é apresentada na Fig. 6, para alguns instantes de tempo escolhidos aleatoriamente.

Analisando-se a Fig. 6, é possível concluir que o processo de secagem ocorre mais rapidamente nas regiões mais externas do que na parte central do sólido. Nota-se que o canto superior direito é o que seca de forma mais rápida, já que é uma região com maior contato com o meio externo. A região localizada no canto inferior esquerdo é a que demora mais a secar, já que corresponde ao centro do paralelepípedo (ponto mais interno do sólido). Para o instante $200,0$ min,

por exemplo, a região mais próxima à fronteira já atingiu o teor de umidade de equilíbrio, enquanto a região mais interna está ligeiramente mais úmida.

Gráficos de contorno mostrando a distribuição espacial do teor de umidade para todas as temperaturas do ar de secagem, em $t = 30$ min, são mostrados na Fig. 7, através da qual, pode-se ratificar a conclusão obtida através da Fig. 5: as placas cerâmicas secam mais rapidamente à medida que a temperatura do ar de secagem cresce. Para $T = 50,0$ °C, por exemplo, nenhuma região atingiu ainda o teor de umidade de equilíbrio no instante analisado, enquanto que para as outras temperaturas, o canto superior direito atingiu o valor de

Tabela IV - Resultados dos parâmetros determinados para quatro temperaturas.

[Table IV - Results of the parameters determined for four temperatures.]

Temperatura (°C)	D (10^{-10} m ² s ⁻¹)	h (10^{-6} m.s ⁻¹)	R ²	χ^2 (10^{-5})
50,0	7,293	1,933	0,9952	6,2709
60,0	8,105	2,138	0,9962	5,3212
70,0	11,64	2,267	0,9971	4,1428
90,0	14,40	3,400	0,9984	1,6832

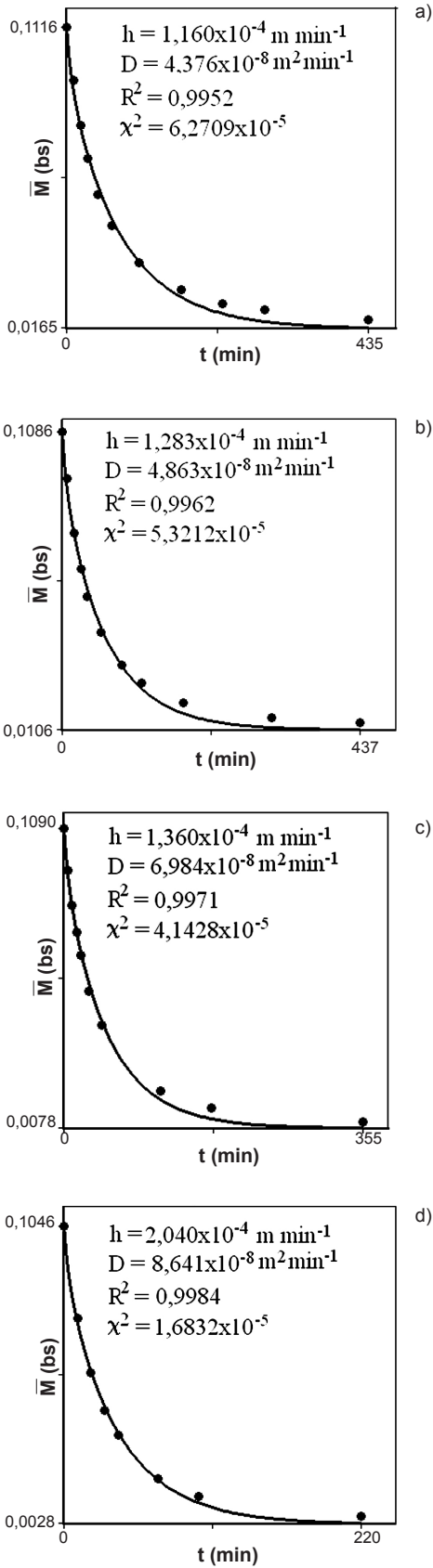


Figura 4: Simulação da cinética de secagem a: (a) 50,0 °C, (b) 60,0 °C, (c) 70,0 °C, (d) 90,0 °C.
 [Figure 4: Simulation of the air drying at: (a) 50.0 °C, (b) 60.0 °C, (c) 70.0 °C, (d) 90.0 °C.]

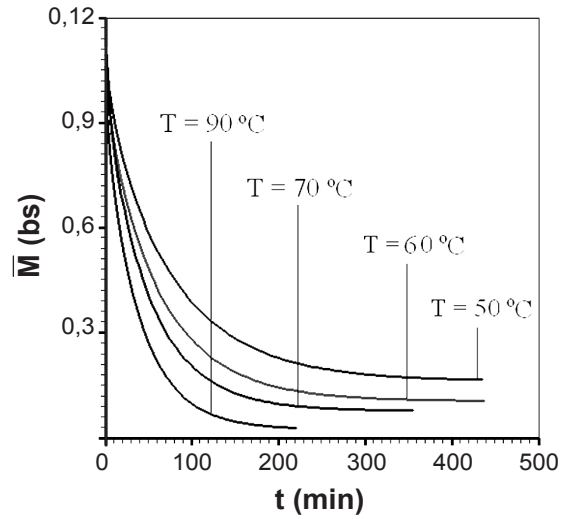


Figura 5: Superposição das cinéticas de secagem para as quatro temperaturas.
 [Figure 5: Superposition of the drying kinetics for the four temperatures.]

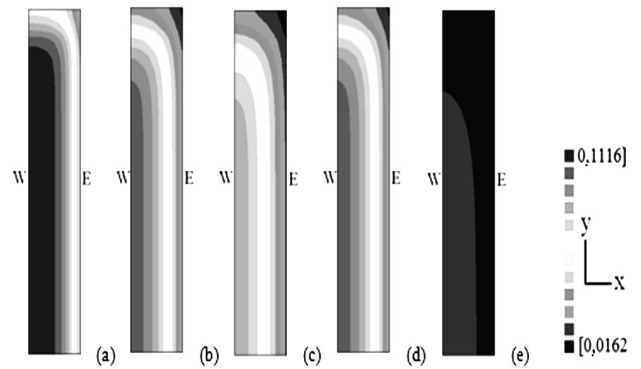


Figura 6: Distribuição espacial do teor de umidade para $T = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$, nos seguintes instantes de tempo: (a) $t = 10,0 \text{ min}$; (b) $t = 30,0 \text{ min}$; (c) $t = 50,0 \text{ min}$; (d) $t = 100,0 \text{ min}$; (e) $t = 200,0 \text{ min}$.
 [Figure 6: Spatial distribution of water content for $T = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$, in the following time instants: (a) $t = 10,0 \text{ min}$, (b) $t = 30,0 \text{ min}$, (c) $t = 50,0 \text{ min}$, (d) $t = 100,0 \text{ min}$, (e) $t = 200,0 \text{ min}$.]

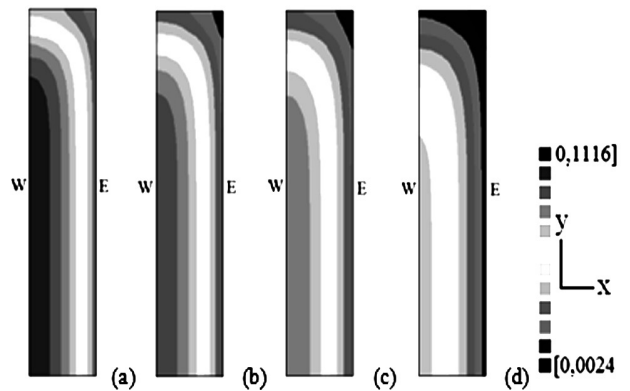


Figura 7: Distribuição espacial do teor de umidade no tempo $t = 30 \text{ min}$, para as seguintes temperaturas de secagem: (a) $T = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) $T = 60,0 \text{ }^\circ\text{C}$, (c) $T = 70,0 \text{ }^\circ\text{C}$, (d) $T = 90,0 \text{ }^\circ\text{C}$.
 [Figure 7: Spatial distribution of the moisture content at $t = 30 \text{ min}$, to the following drying temperature: (a) $T = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) $T = 60,0 \text{ }^\circ\text{C}$, (c) $T = 70,0 \text{ }^\circ\text{C}$, (d) $T = 90,0 \text{ }^\circ\text{C}$.]

equilíbrio para o teor de umidade. No caso da temperatura de 90,0 °C, a região que atingiu o teor de umidade de equilíbrio é bem maior, compreendendo também toda face externa do lado direito do sólido.

CONCLUSÃO

O algoritmo de otimização utilizado para determinação de D e h produziu resultados consistentes com os valores esperados. A principal vantagem deste algoritmo é o fato de não ser necessário informar valores iniciais (ou faixas de valores) para os parâmetros a serem determinados. Por tratar-se de solução analítica, uma das desvantagens é a imposição de volume e parâmetros termofísicos constantes durante o processo de secagem. Com relação ao modelo de difusão líquida utilizado, pode-se afirmar que ele descreve de forma satisfatória a cinética de secagem das placas cerâmicas de revestimento, visto que os parâmetros estatísticos podem ser considerados bons e visualmente, pode-se observar que a curva simulada apresenta uma boa coincidência com os pontos experimentais, durante quase todo o processo. A análise da cinética de secagem indica que na parte final do processo, em todas as temperaturas investigadas, o valor da difusividade efetiva da água deveria ser um pouco menor do que o valor obtido. Então, para uma descrição rigorosa do processo de secagem, uma expressão adequada para a difusividade efetiva da água, que diminui quando diminui o teor de umidade, pode render melhores resultados do que os obtidos no presente artigo. Neste caso, a solução analítica apresentada aqui deve ser substituída por uma solução numérica, que permite simular processos de difusão envolvendo difusividade variável. Mas, pelo menos, os resultados apresentados neste estudo servem como uma primeira e boa ideia sobre o processo investigado. Além disso, os resultados obtidos para os parâmetros de processo podem ser usados como valores iniciais em outros processos de otimização.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Boukadida, S. B. Nasrallah, *Drying Techn.* **20**, 1 (2002) 67-91.
- [2] M. A. Cadê, J. J. S. Nascimento, A. G. B. Lima, *Rev. Matéria* **10**, 3 (2005) 433-453.
- [3] V. R. Batista, J. J. S. Nascimento, A. G. B. Lima, *Rev. Elet. Mater. Proc.* **3**, 1 (2008) 46-61.
- [4] G. Musielak, *Drying Techn.* **19**, 8 (2001) 1645-1659.
- [5] R. Maciulaitis, J. Malaiškien, A. Kicait, *J. Civil Eng. Manag.* **14**, 4 (2008) 263-268.
- [6] R. Maciulaitis, J. Malaiškien, *J. Civil Eng. Manag.* **15**, 2 (2009) 197-204.
- [7] G. Musielak, D. Mierzwa, *Drying Techn.* **27**, 7-8 (2009) 894-902.
- [8] H. J. Alves, F. G. Melchiades, A. O. Boschi, *Cerâmica* **54**, 331 (2008) 326-331.
- [9] C. M. F. Vieira, H. S. Feitosa, S. N. Monteiro, *Ceram. Ind.* **8**, 1 (2003) 42-46.
- [10] J. J. S. Nascimento, A. G. B. Lima, B. J. Teruel, F. A. Belo, *Inf. Tecnol.* **17**, 6 (2006) 145-151.
- [11] R. T. Zauberas, P. L. S. Gomes, C. A. R. Diniz, A. O. Boschi, *Cerâmica* **50**, 313 (2004) 33-37.
- [12] S. J. G. Sousa, J. N. F. Holanda, *Cerâmica* **51**, 317 (2005) 70-76.
- [13] E. T. A. Souza, S. N. Monteiro, C. M. F. Vieira, *Cerâmica* **50**, 314 (2004) 122-127.
- [14] M. N. Freire, J. N. F. Holanda, *Cerâmica* **52**, 324 (2006) 240-244.
- [15] L. Sánchez-Muñoz, S. S. Cava, C. A. Paskocimas, E. Cerisuelo, E. Longo, J. B. Carda, *Cerâmica* **48**, 307 (2002) 137-145.
- [16] C. M. F. Vieira, S. N. Monteiro, J. D. Filho, *Ceram. Ind.* **6**, 6 (2001) 43-49.
- [17] F. G. Melchiades, C. Del Roveri, J. Sotério, L. L. Silva, A. O. Boschi, *Ceram. Ind.* **6**, 6 (2001) 11-17.
- [18] D. Skansi, S. Tomas, *Ceram. Int.* **21**, 3 (1995) 207-211.
- [19] A. Sander, D. Skansi, N. Bolf, *Ceram. Int.* **29**, 3 (2003) 641-653.
- [20] S. L. Su, *Appl. Clay Sci.* **12**, 3 (1997) 189-207.
- [21] S. Chemkhi, F. Zagrouba, *Braz. J. Chem. Eng.* **25**, 3 (2008) 503-514.
- [22] A. Y. Looi, K. Golonka, M. Rhodes, *Chem. Eng. J.* **87**, 3 (2002) 329-338.
- [23] S. Chemkhi, F. Zagrouba, *Desalination* **185**, 1-3 (2005) 491-498.
- [24] V. S. O. Farias, W. P. Silva, C. M. D. P. S. Silva, P. L. Nascimento, A. G. B. Lima, *Anais CONEM 2010, VI Cong. Eng. Mec.* (2010).
- [25] Y. Itaya, S. Uchiyama, S. Hatano, S. Mori, *Drying Technol.* **23**, 6 (2005) 1243-1255.
- [26] A. Hasatani, Y. Itaya, *Int. Drying Symp. Parte A* (1992) 190-199.
- [27] M. Amendola, M. R. Queiroz, *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* **11**, 6 (2007) 623-627.
- [28] W. P. Silva, J. W. Precker, C. M. D. P. S. Silva, D. D. P. S. Silva, *J. Food Eng.* **95**, 2 (2009) 298-304.
- [29] W. P. Silva, L. D. Silva, C. M. D. P. S. Silva, P. L. Nascimento, *Wood Sci. Techn.* **45**, 4 (2011) 787-800.
- [30] W. P. Silva, C. M. D. P. S. Silva, V. S. O. Farias, J. P. Gomes, *Drying Techn.* **30**, 2 (2012) 164-174.
- [31] A. V. Luikov, "Analytical Heat Diffusion Theory", Academic Press, Inc. Ltd., London, UK (1968).
- [32] J. Crank, "The Mathematics of Diffusion", Clarendon Press, Oxford, UK (1992).
- [33] W. Olek, P. Perré, J. Weres, *Holzforchung* **59**, 1 (2005) 38-45.
- [34] P. R. Bevington, D. K. Robinson, "Data reduction and error analysis for the Physical Sciences", 2nd Ed., WCB/McGraw-Hill, Boston, EUA (1992).
- [35] J. R. Taylor, "An Introduction to Error Analysis", University Science Books, 2nd Ed., Sausalito, CA, EUA (1997).

(Rec. 27/09/2012, Ac. 02/02/2013)