

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE TERMO – HÍDRICA DURANTE A SECAGEM DE UM MATERIAL CERÂMICO VAZADO USANDO O MÉTODO DE ANÁLISE CONCENTRADA

Veralúcia Severina da Silva, veralucia.silva84@yahoo.com.br¹

Gustavo Igor da Silva, gustavoigor018@gmail.com²

Diniz Ramos de Lima Junior, diniz.junior@caruaru.ifpe.edu.br²

George Alberto Gaudêncio de Melo, george.gaudencio@caruaru.ifpe.edu.br²

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br¹

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima, wan_magno@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, R. Aprígio Veloso, 882 – Bodocongó, Campina Grande – PB, 58429-900

²Instituto Federal de Pernambuco, Distrito Industrial III – Estr. do Alto do Moura, Caruaru – PE, 55040-120

Resumo: A secagem é um processo termodinâmico, em que há transferência simultânea de calor e a remoção da umidade de um material poroso. Os produtos argilosos quando expostos a uma secagem sem controle pode sofrer fissuras e deformações, reduzindo sua qualidade na pós-secagem. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento da transferência de calor e massa na secagem de sólidos vazados com forma arbitrária usando o método da capacitância global. A aplicação foi realizada para a secagem de produtos cerâmicos. A solução analítica das equações governantes foi feita usando o método de separação de variáveis. Resultados cinéticos de perda de massa e aquecimento de peças cerâmicas para diferentes condições são apresentados e analisados. Observou-se que o processo de perda de umidade ocorre a uma velocidade mais baixa do que o aquecimento do material cerâmico, devido ao fato de sua difusividade térmica ser maior do que a difusividade de massa e que a temperatura e forma do corpo afetam fortemente os fenômenos de transporte de calor e massa.

Palavras-chave: secagem, analítico, argila, calor, massa

1. INTRODUÇÃO

O avanço da ciência e da tecnologia tem favorecido a busca incessante do homem, por situações confortáveis que facilite a sua vida e amenize ou resolva alguns problemas existentes no seu dia a dia, o que torna o aperfeiçoamento ou desenvolvimento de novos produtos cada vez mais complexo devido a grande demanda.

Com o processo de secagem não poderia ser diferente. A secagem de sólidos é uma das mais antigas e usuais operações existentes, utilizadas pelo homem, encontradas nos mais diversos processos usados nas indústrias agrícola, cerâmica, química, alimentícia, farmacêutica, de papel e celulose, mineral e de polímeros.

As razões para a realização do processo de secagem em materiais sólidos são tantas quantos são os materiais que podem ser secos. Por exemplo, na indústria alimentícia, o principal objetivo do processo de secagem desse tipo de produto é a remoção da água do produto com o propósito de reduzir o seu nível de contaminação microbiológica, evitando assim a perda do produto e prolongando o seu tempo de vida útil durante o seu armazenamento. Na indústria cerâmica, água é adicionada para dar plasticidade a mesma e facilitar a conformação da peça de interesse. Durante o seu processo de fabricação, os produtos cerâmicos, passam pelas etapas de conformação, secagem e queima. Com o processo de secagem, a indústria cerâmica visa retirar a água do produto, preparando-o para a queima. É nele que tem-se a eliminação da maior quantidade de água e consequentemente uma maior retração das peças. Assim, os procedimentos adotados durante o processo da retirada da água desse material influenciam na qualidade final do produto, evitando a sua perda e a sua inutilidade. Outro fator a ser observado nessa etapa é a dependência de vários outros fatores que antecedem a secagem, tais como, propriedades químicas e mineralógicas do material, teor de umidade e granulometria do material cerâmico (Almeida, 2009). De modo geral, durante a secagem, dependendo da natureza do material, podem ocorrer variações nas suas características físicas, químicas e biológicas.

O processo de secagem pode ocorrer de forma natural, mista ou artificial. No entanto, a análise da secagem é muitas vezes baseada em condições externas, entre elas pode-se citar a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar, que estão diretamente relacionadas com a taxa de secagem exclusiva de cada tipo de sólido.

No Brasil, a indústria de cerâmica tem um papel importante para a economia do país; a disponibilidade de matérias primas naturais, fontes alternativas de energia e tecnologias práticas embutidas no equipamento industrial torna as indústrias brasileiras muito competitivas no mercado nacional (Lima et al., 2015, Silva et al., 2016).

Conceitualmente, pode-se definir como material cerâmico qualquer material inorgânico e não metálico normalmente obtido após tratamento térmico a altas temperaturas. São várias as matérias primas das quais se podem produzir materiais cerâmicos. A principal delas é a argila, definida como um material natural, terroso e fino que, ao ser misturado com água, adquire plasticidade, tornando-se fácil de ser moldado (Dias, 2013).

A etapa de secagem tem uma importância relevante no processo de fabricação dos materiais cerâmicos, uma vez que a taxa de secagem rápida provoca variações de maior volume das peças que podem gerar rachaduras e fissuras no material (Lehmkuhl, 2004; Lucena, 2005; Almeida, 2009; Silva, 2009; Silva et al., 2011; Silva et al., 2012; Almeida et al., 2013; Lima, 2014; Almeida et al., 2014; Lima et al., 2015; Silva et al., 2016).

Tendo em vista, evitar que a peça exploda dentro do forno, antes da queima torna-se necessário que seja feita a secagem da peça cerâmica para que a água acumulada nos poros seja retirada. Durante o processo de secagem de um material cerâmico, a água contida no mesmo migra para a atmosfera exterior, enquanto que o calor, proveniente do ar de secagem, penetra do exterior para o interior do material, onde a temperatura é menor. Como a camada exterior do material cerâmico seca mais rápido do que o seu interior (uma vez que está em contato direto como o ar de secagem), essa camada contrai-se primeiro.

O estudo de secagem tem sido muito difundido dentro do meio acadêmico. Diante disso, vários modelos matemáticos têm sido propostos para descrever o processo de transferência de calor e massa na secagem dos materiais sólidos. A vantagem deste procedimento é que se minimiza o número de experiências realizadas, além, de facilitar a obtenção de resultados com muita rapidez.

Diante do exposto, surgem as questões: Quais métodos utilizar durante a secagem de um material cerâmico? Quais procedimentos e temperaturas amenizam os defeitos causados durante a secagem do material cerâmico e o inviabiliza comercialmente? Qual modelo matemático mais adequado para representá-lo? Assim, visando amenizar os danos estruturais causados ao material cerâmico durante o processo de secagem e conhecer o mecanismo de transferência de umidade e calor no produto estudado, este trabalho propõe uma análise do comportamento térmico e hídrico durante a secagem de materiais cerâmicos vazados com forma arbitrária usando o método da análise concentrada.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para modelar o processo de secagem de sólidos cerâmicos e argilosos com forma arbitrária, as seguintes considerações foram adotadas:

- (a) O sólido cerâmico é homogêneo e isotrópico;
- (b) As distribuições de umidade e temperatura no interior do sólido são uniformes;
- (c) As propriedades termofísicas são constantes durante todo o processo;
- (d) O fenômeno de secagem ocorre por condução de calor e massa no interior do sólido e por convecção de calor e massa e evaporação, na superfície do mesmo.

Para compreensão do método da análise concentrada considere um corpo sólido de forma arbitrária como ilustrado na Figura 1. O sólido pode receber (ou ceder) um fluxo de calor e/ou umidade por unidade de área em sua superfície e ter geração interna de massa e/ou energia por unidade de volume uniformemente distribuída.

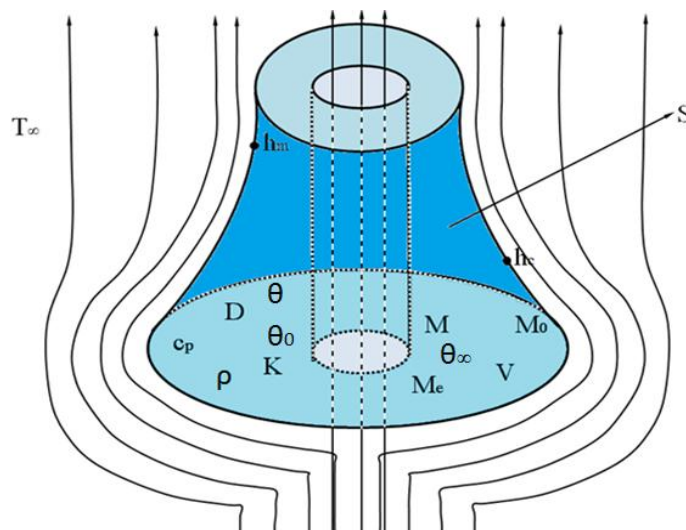


Figura 1 – Esquema representativo de um sólido com geometria arbitrária.

Na Figura 1, T_{∞} é a temperatura do meio externo ($^{\circ}\text{C}$); θ_{∞} é a temperatura de equilíbrio (K); θ_0 é a temperatura inicial do produto ($^{\circ}\text{C}$); θ é a temperatura do produto em qualquer instante do processo ($^{\circ}\text{C}$); h_c é o coeficiente de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$); h_m é o coeficiente de transferência de massa (m/s); V é o volume do sólido homogêneo (m^3); S é a área superficial do sólido homogêneo (m^2); c_p é o calor específico (J/kgK); M é o teor de umidade do produto em qualquer intervalo de tempo (kg/kg); M_0 é o teor de umidade inicial do produto (kg/kg)(b.s) e M_e é o teor de umidade de equilíbrio (kg/kg)(b.s).

Aplicando um balanço de massa e energia num elemento infinitesimal na superfície do sólido, em qualquer sistema de coordenadas, assumindo propriedades termofísicas constantes e variações dimensionais desprezíveis, tem-se as seguintes equações de conservação de massa e energia, respectivamente (Silva, 2002):

$$V \frac{dM}{dt} = -h_m S(M - M_e) + \dot{M}V \quad (1)$$

$$V\rho \frac{d\theta}{dt} = -\frac{q''}{c_p} S + \frac{\dot{q}}{c_p} V \quad (2)$$

onde ρ é a densidade do sólido homogêneo (kg/m^3); t é o tempo (s); M'' é o fluxo de massa por unidade de área ($\text{kg}/\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$); $\dot{M}$ é a geração de massa por unidade de volume ($\text{kg}/\text{kg}/\text{s}/\text{m}^3$); q'' é o fluxo de calor por unidade de área (W/m^2); $\dot{q}$ é a geração de calor por unidade de volume (W/m^3) e θ é a temperatura do sólido homogêneo (K) ou ($^{\circ}\text{C}$).

As quantidades q'' , M'' , $\dot{q}$ e $\dot{M}$ podem ser positivas ou negativas, podendo também serem constantes ou dependentes do tempo. Particularmente com respeito à energia, a quantidade q'' pode ser convectiva, radiativa, evaporativa e/ou aquecimento de vapor. A presente formulação pode ser aplicada em regiões de transferência de calor e massa simultânea. O caso particular ocorre quando os dois fenômenos são completamente independentes. Os dois fenômenos são acoplados quando absorção e dessorção na região são acompanhadas de efeitos térmicos.

Diante do exposto, e sabendo que em muitas situações físicas e condições operacionais existe gradiente de umidade e temperatura dentro do sólido, sob que condições pode-se aplicar o método da capacitância global? É neste sentido que entra o número de Biot de transferência.

O significado físico do número de Biot de transferência é tido como a relação numérica entre a resistência à condução no interior do corpo e uma resistência a convecção na superfície do mesmo.

$$\text{Bi} = \frac{R_{\text{Cond}}}{R_{\text{Conv}}} = \frac{\frac{L_1}{\Gamma\Phi S}}{\frac{1}{hS}} = \frac{hL_1}{\Gamma\Phi} \quad (3)$$

onde $\Gamma\Phi$ pode ser K ou D, e L_1 é um comprimento característico de corpo, como por exemplo, a relação volume por área superficial do corpo.

O número de Biot, tem um papel fundamental nos problemas de difusão que envolve efeitos convectivos nas fronteiras. Para $\text{Bi} \ll 1$, os resultados experimentais sugerem supor uma razoável distribuição uniforme de M ou θ ao longo do corpo, em qualquer instante t , do processo transiente. Pode-se concluir que para a análise de um problema de difusão de massa e térmica, deve-se calcular o número de Biot e, uma vez sendo este inferior a 0,1, o erro associado ao uso do método da capacitância global é pequeno, entretanto, este valor é dependente da forma como este parâmetro é definido.

2.1. Análise da Transferência de Massa

Usando a condição inicial $M(t=0)=M_0$, separando-se as variáveis da Equação (1) e integrando-a desde a condição inicial, tem-se:

$$\frac{(M-M_e) - \frac{M_0 V}{h_m S}}{(M_0-M_e) - \frac{M_0 V}{h_m S}} = \text{Exp} \left[\left(-\frac{h_m S}{V} \right) t \right] \quad (4)$$

2.2. Análise da Transferência de Calor e Massa Simultânea

Para a análise da transferência de calor, pode-se fazer analogia a transferência de massa e assumir que na superfície do sólido ocorre simultaneamente convecção térmica, evaporação e aquecimento do vapor produzido. Sendo assim, a Equação (2), pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\rho V \frac{d\theta}{dt} = \frac{h_c (\theta_{\infty} - \theta) + \frac{\rho_s V dM}{S dt} (h_{fg} + c_v (\theta_{\infty} - \theta))}{c_p} S + \frac{\dot{q} V}{c_p} \quad (5)$$

onde, c_v é o calor específico do vapor (J/kgK); h_{fg} é o calor latente de vaporização da água (J/kg); θ_∞ é a temperatura do meio externo (K); θ_0 é a temperatura inicial do sólido (°C); θ é a temperatura instantânea do sólido (°C); ρ_s é a massa específica do sólido seco (kg/m³); h_c é o coeficiente de transferência de calor (W/m²K).

Realizando a substituição da Equação (1) na Equação (5), tem-se como resultado:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left[(-\rho_s h_m (\bar{M}_0 - \bar{M}_e) + \frac{\dot{M} V \rho_s}{S}) \frac{h_{fg} S}{\rho V c_p} \right] \text{Exp} \left[-\left(\frac{h_m S}{V} \right) t \right] + \left[\frac{h_c S}{\rho V c_p} + (-\rho_s h_m (\bar{M}_0 - \bar{M}_e) + \frac{\dot{M} V \rho_s}{S}) \frac{c_p S}{\rho V c_p} \right] \text{Exp} \left[-\left(\frac{h_m S}{V} \right) t \right] (\theta_\infty - \theta_0) + \frac{\dot{q}}{\rho c_p} \quad (6)$$

A Equação (6), é uma equação diferencial ordinária de primeira ordem, não linear e não homogênea, portanto não pode ser resolvida de forma analítica. Assim, para simplificação da Equação (6) desconsidera-se a energia necessária para aquecer o vapor d'água desde a temperatura na superfície do sólido até a temperatura do fluido. A equação simplificada é mostrada a seguir:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left\{ \left[\left(-\rho_s h_m (M_0 - M_e) + \frac{\dot{M} V \rho_s}{S} \right) \frac{h_{fg} S}{\rho V c_p} \right] \text{Exp} \left[-\left(\frac{h_m S}{V} \right) t \right] + \left[\frac{h_c S}{\rho V c_p} (\theta_\infty - \theta_0) \right] + \frac{\dot{q}}{\rho c_p} \right\} \quad (7)$$

Usando a condição inicial $\theta(t=0) = \theta_0$, separando-se as variáveis da Equação (7) e integrando-a desde a condição inicial, tem-se:

$$\frac{\theta - \theta_\infty - \left\{ \left[\left(\rho_s h_m (M_0 - M_e) + \frac{\dot{M} V \rho_s}{S} \right) \frac{h_{fg}}{h_c} \right] \text{Exp} \left[-\left(\frac{h_m S}{V} \right) t \right] + \frac{\dot{q} V}{h_c S} \right\}}{\theta_0 - \theta_\infty - \left\{ \left[\left(\rho_s h_m (M_0 - M_e) + \frac{\dot{M} V \rho_s}{S} \right) \frac{h_{fg}}{h_c} \right] \text{Exp} \left[-\left(\frac{h_m S}{V} \right) t \right] + \frac{\dot{q} V}{h_c S} \right\}} = \text{Exp} \left[-\left(\frac{h_c S}{\rho V c_p} \right) t \right] \quad (8)$$

Para uma melhor análise dos parâmetros que compõem as Equações (5) e (9), as mesmas foram resolvidas com o auxílio do software Mathematica[®]. Os resultados foram expostos na forma gráfica utilizando o software Grapher[®].

Para encontrar o volume dos corpos cerâmicos estudados nessa pesquisa utilizou-se o método dos anéis circulares em sólidos de revolução (Munem e Foulis, 1978). Este método consiste em supor que f e g são funções contínuas não negativas no intervalo $[y_1, y_2]$ tais que $f(y) \geq g(y)$ para todos os valores de y em $[y_1, y_2]$, e seja R a região planar limitada pelos gráficos de f e g entre $y=y_1$ e $y=y_2$ (Figura 2a). Seja S o sólido gerado pela revolução de R em torno do eixo x (Figura 2b e 2c)

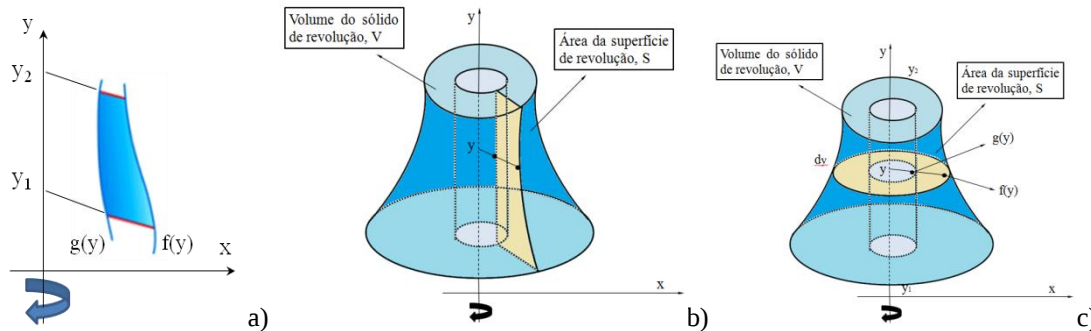


Figura 2 – a) Região Plana, b) Revolução da região plana e c) Sólido de revolução

Considere uma porção infinitesimal dV do volume V de área rachurada constituída de um anel circular de espessura infinitesimal dy (Figura 2c), perpendicular ao eixo de revolução e centrado no ponto de coordenada y . A base desse anel circular é a região entre os dois círculos concêntricos de raio $f(y)$ e $g(y)$, logo a área desta base é $\pi f(y)^2 - \pi g(y)^2$ unidades quadrada. De modo que:

$$V = \int_{y_1}^{y_2} \pi [f(y)^2 - g(y)^2] dy \quad (9)$$

A área de superfície dos sólidos de revolução estudados nessa pesquisa foi obtido pela revolução gerada pela rotação da porção do gráfico das funções $f(y)$ e $g(y)$ contínuas e não negativas entre as retas $y=y_1$ e $y=y_2$ em torno do eixo y (Munem e Foulis, 1978), de modo que:

$$S = \int_{y_1}^{y_2} 2\pi f(y) \sqrt{1 + [f'(y)]^2} dy + \int_{y_1}^{y_2} 2\pi g(y) \sqrt{1 + [g'(y)]^2} dy + \pi \{ [a^m (1 - \frac{y^2}{b^2})^{1/m}]^2 - g(y)^2 \} + \pi [a^2 - g(y)^2] \quad (10)$$

Nesta pesquisa adotou-se:

$$f(y) = \left\{ a^m \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (11)$$

$$g(y) = a' = \text{constante} \quad (12)$$

onde $x_1=a$, $y_1=0$, $y_2=b'$, $y_3=b$ e m são constantes que definem a forma do corpo.

A Tabela 1 contém os parâmetros dos casos estudados nesta pesquisa, enquanto que na Tabela 2 estão apresentados as propriedades do material cerâmico argiloso e do ar de secagem.

Tabela 1. Valores dos parâmetros geométricos do sólido de revolução

a(m)	b(m)	m	b'(m)	a'(m)	S (área) m ²	V (volume) m ³
0,05	0,2	0,5	0,100	0,005	0.0405890	0.000567978

Tabela 2. Parâmetros dos materiais usados nas simulações

Parâmetros	Material	
	Sólido	Ar
Densidade (kg/m ³)	640 (úmido)	-
Densidade (kg/m ³)	550 (seco)	-
Calor específico (J/kgK)	1600 (úmido)	-
Calor latente de vaporização da água no sólido (J/kgK)	2333x10 ³	-
Temperatura final (°C)	70	70
Temperatura inicial (°C)	25	70
Teor de umidade inicial (kg _{água} /kg _{produto seco})	0,2	-
Teor de umidade de equilíbrio (kg _{água} /kg _{produto seco})	0,01	-
Coefficiente de transferência de massa convectivo (m/s)	1,8x10 ⁻⁹	
Coefficiente de transferência de calor convectivo (W/m ² K)	1,5	

Para obtenção e análise dos resultados foram definidos alguns parâmetros adimensionais como segue:

$$M^* = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (13)$$

$$P^* = \frac{\dot{M}V}{h_m S (M_0 - M_e)} \quad (14)$$

$$Fo_m = \frac{Dt}{L_1^2} \quad (15)$$

$$Bi_m = \frac{h_m L_1}{D} \quad (16)$$

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_\infty - \theta_0} \quad (17)$$

$$Q^* = \frac{q L_1}{s^* h_c (\theta_\infty - \theta_0)} \quad (18)$$

$$Fo_c = \frac{\alpha t}{L_1^2} \quad (19)$$

$$Bi_c = \frac{h_c L_1}{k} \quad (20)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 3 a 5 têm-se, respectivamente, os valores do teor de umidade adimensional (M^*) em função do tempo adimensional (Fo_m), variando o parâmetro de geração de massa P^* , o número de Biot para transferência de massa Bi_m e o termo de geração de calor Q^* conforme o caso apresentado. Percebe-se nos casos analisados que a curva de secagem sofre uma variação no comportamento, diante da variação dos valores do parâmetro pesquisado.

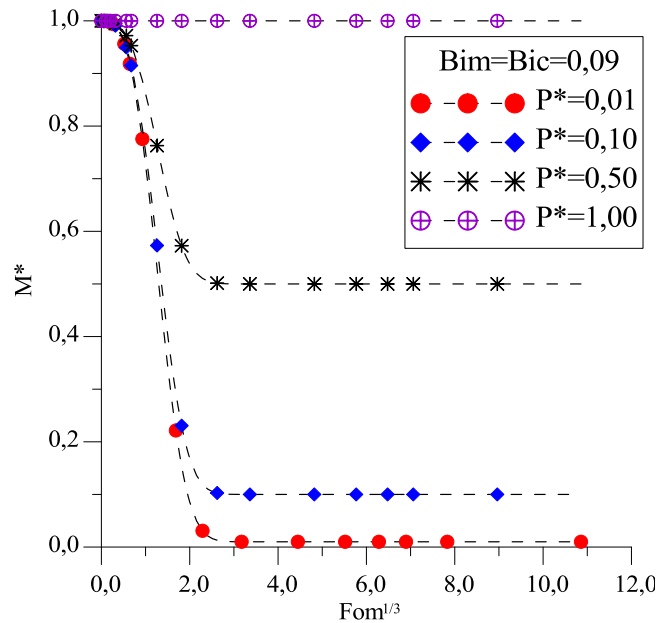


Figura 3 – Influência do parâmetro P^* sobre o teor de umidade adimensional em função do tempo adimensional.

Conforme a Figura 3, o parâmetro P^* influencia diretamente no processo de secagem. Uma vez que, tal parâmetro está relacionado ao volume do produto, aos fenômenos internos que ocorrem dentro do material durante o processo, o coeficiente que representa a velocidade com que o fluido está passando sobre o produto, a área superficial e a diferença entre o teor de umidade inicial e o de equilíbrio do produto durante o processo, percebe-se que, para as condições apresentadas quanto menor o valor desse parâmetro mais rápido o produto ficará seco. No entanto, para o valor máximo pesquisado ($P^* = 1,00$), o produto não ficará seco ao longo do tempo, permanecendo úmido durante todo o processo. Isto é, o produto já está na sua condição de equilíbrio higroscópico.

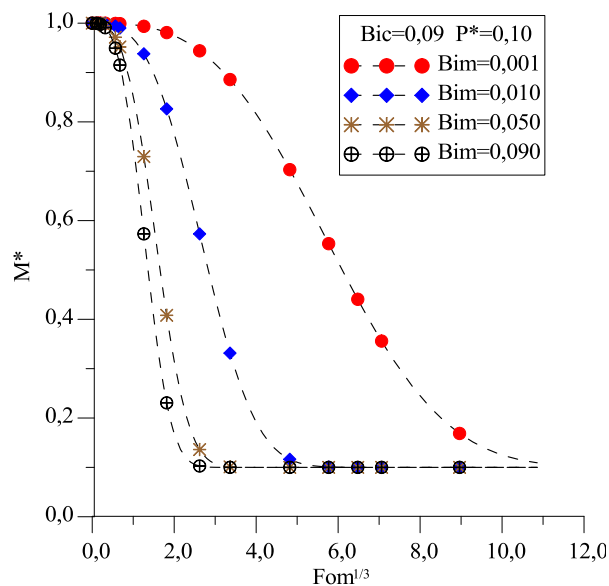


Figura 4 – Influência do parâmetro Bi_m sobre o teor de umidade adimensional em função do tempo adimensional.

Fixando um valor para o P^* e variando o número de Biot de massa (Bi_m), a curva de secagem apresenta um comportamento interessante (Figura 4). Utilizando o método da análise concentrada o Bi_m tem que ser inferior a 1, quanto maior Bi_m mais rápido é a secagem e o produto atinge sua condição de equilíbrio mais rapidamente. Em todos os casos, os gradientes de temperatura e umidade são desprezíveis durante o processo, fato que favorece a uma secagem por igual, uniforme e responsável por reduzir os defeitos no produto que ocorrem durante a secagem. Porém, percebe-se que se esse número for muito baixo, atende as condições do método da análise concentrada, mas torna inviável o processo, pois aumentará demasiadamente o tempo de secagem e reduzirá drasticamente a produtividade. A Figura 5 ilustra o comportamento do teor de umidade adimensional em função do tempo adimensional para diferentes valores do termo de geração de calor Q^* . Analisando, a Figura 5 verifica-se que, independente do valor determinado para o parâmetro Q^* , todas as curvas se sobrepõem, pois mediante o processo da análise concentrada (Equação 1), desprezam-se os fenômenos de geração de calor ocorridos durante o processo de transferência de massa, só afetando o fenômeno de transferência de calor.

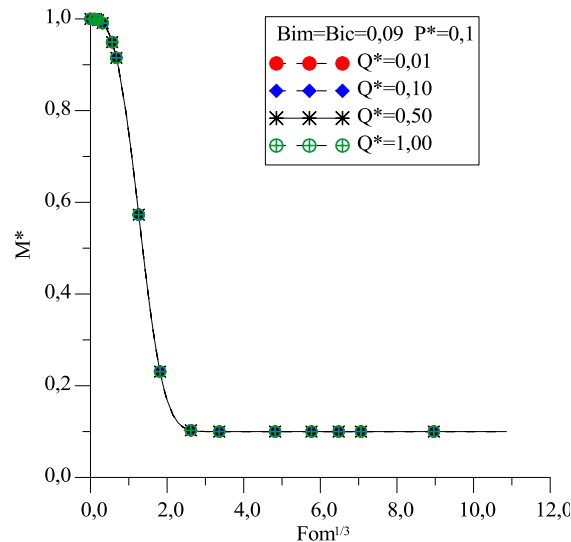


Figura 5 – Influência do parâmetro Q^* sobre o teor de umidade adimensional em função do tempo adimensional.

As Figuras 6 a 8 ilustram o comportamento de teor de umidade e temperatura (adimensional) em função do tempo adimensional, (numero de Fourier de transferência). Para a cinética de secagem, $Fo = Fo_m$ e para a cinética de aquecimento, $Fo = Fo_c$.

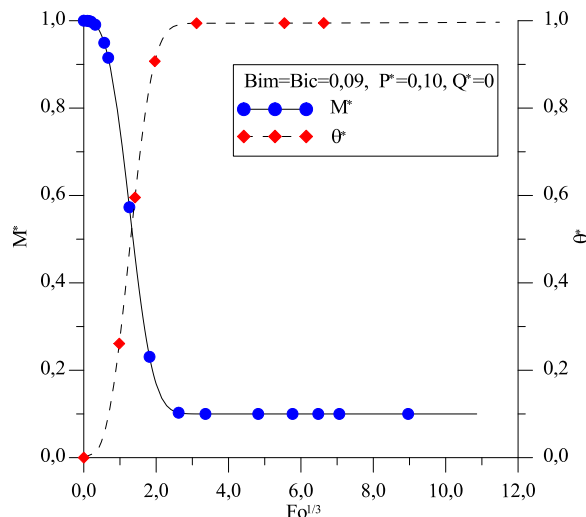


Figura 6 – Comportamento do teor de umidade e temperatura do material cerâmico em função do número de Fourier ($Bi_m = Bi_c = 0,09$, $P^* = 0,10$ e $Q^* = 0$).

Analisando as Figuras 6 a 8 observa-se que o comportamento do teor de umidade com a temperatura do produto durante o processo de secagem em função do número de Fourier apresenta-se aproximadamente simétrico. Contudo, em situações reais o produto se aquece mais rápido que a perda de umidade. No entanto, quando coloca-se o resultado na sua forma adimensional tem-se todos os parâmetros envolvidos no processo agrupados, o que generaliza fortemente os

resultados. Verifica-se que, independente do parâmetro pesquisado percebe-se que o produto aquece até o seu limite máximo, porém a perda de umidade ocorre apenas até atingir o seu equilíbrio dada por P^* .

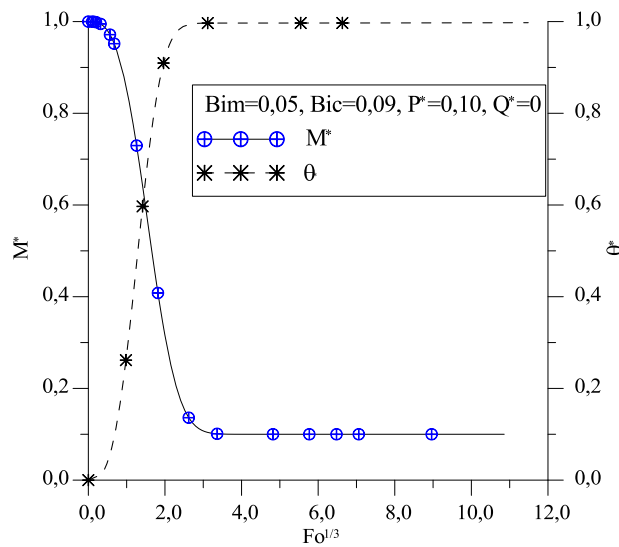


Figura 7 – Comportamento do teor de umidade e temperatura do material cerâmico em função do número de Fourier ($Bi_m = 0,05$, $Bi_c = 0,09$, $P^* = 0,10$ e $Q^* = 0$).

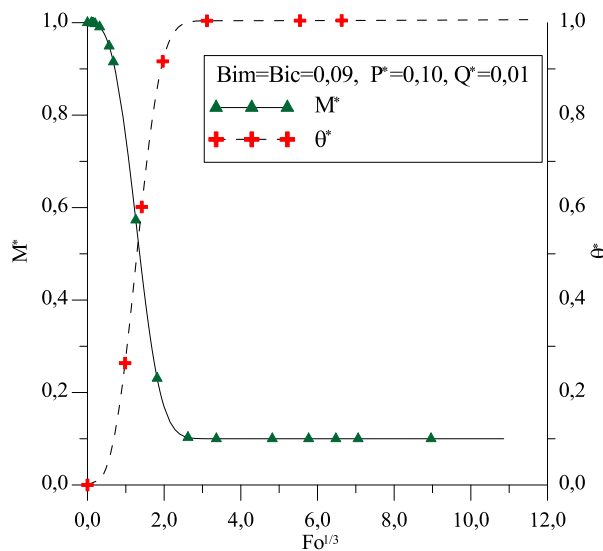


Figura 8 – Comportamento do teor de umidade e temperatura do material cerâmico em função do número de Fourier ($Bi_m = Bi_c = 0,09$, $P^* = 0,10$ e $Q^* = 0,01$).

4. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados apresentados pode-se concluir que:

- É vantajoso tratar o problema proposto de transferência de calor e massa na forma adimensional. A solução independe das propriedades termofísicas, dimensões e das condições iniciais e finais do material;
- Fixando o Bi_m , o decréscimo do parâmetro P^* , aumentam a velocidade de secagem do produto;
- A variação do Bi_m influencia diretamente na produtividade do produto, pois se o Bi_m for muito baixo, aumentará o tempo de secagem;
- O parâmetro Q^* não influencia no processo de transferência de massa; o fenômeno de geração de calor só afeta o aquecimento do material;
- A simultaneidade dos fenômenos de transferência de calor e massa durante o processo de secagem mostra que a transferência de calor ocorre de maneira mais rápida em relação a transferência de massa, de tal forma que contribui para que o mesmo consiga atingir a temperatura de equilíbrio em um menor tempo.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, G. S., 2009, “Simulação e Experimentação da Secagem de Cerâmica Vermelha em Sistemas Térmicos Industriais”, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, Brasil, 211 p.
- Almeida, G. S.; Fernandes, M. A. F. B.; Fernandes, J. N. F.; Neves, G. A.; De Lima, W. M. B.; De Lima, A. G. B., 2014, “Drying of Industrial Ceramic Bricks: An Experimental Investigation in Oven”, Defect and Diffusion Forum, v. 353, pp. 116-120.
- Almeida, G. S.; Silva, J. B.; Joaquina e Silva, C.; Swarnakar, R.; Neves, G. A.; Lima, A. G. B., 2013, “Heat and Mass Transport in an Industrial Tunnel Dryer: Modeling and Simulation Applied to Hollow Bricks”, Applied Thermal Engineering, v. 55, pp. 78-86.
- Bauer, L. A. F., 1994, “Materiais de Construção”, 2ª ed. Rio de Janeiro, Editora LTC, Brasil, 935p.
- Dias, L. G., 2013, “Estudo do Processo de Secagem em Estufa e por Micro-Ondas de Compósitos de Argila e Resíduos de Estatito”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del Rei, Centro Federal de Educação Tecnológica, São João Del Rei – MG, Brasil, 111 p.
- Lehmkuhl, W. A., 2004, “Análise Numérica e Experimental de um Secador Contínuo Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 129 p.
- Lima, W. M. P. B., 2014, “Transferência de Calor e Massa em Materiais Cerâmicos com Forma Complexa Via Método da Capacitância Global”, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Campina Grande - PB, Brasil, 23 p.
- Lima; A. G. B. Silva; J. B. Almeida; G. S. Nascimento; J. J. S. Tavares; F. V. S. Silva. V. S., 2015, “Clay Products Convective Drying: Foundations, Modeling and Applications”, In: J. M. P. Q. Delgado; A. G. Barbosa de Lima. (Org.), Drying and Energy Technologies, Series: Advanced Structured Materials, 63 ed. Heidelberg (Germany), Springer-Verlag, v. 63, pp. 43-70.
- Lucena, C. G., 2005, “Transporte de Massa Durante a Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados Via Volumes Finitos”, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Campina Grande - PB, Brasil, 69 p.
- Munem; M. A., Foulis, D. J., “Cálculo”, Rio de Janeiro, Guanabara dois, 1983.
- Silva, J. B., 2002, “Secagem de Sólidos em Camada Fina Via Análise Concentrada: Modelagem e Simulação”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande - PB, Brasil, 64 p.
- Silva, J. B., 2009, “Simulação e Experimentação da Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados”, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande - PB, Brasil, 199 p.
- Silva, J. B., Almeida, G. S., Neves, G. A., Lima, W. C. P. B., Farias Neto, S. R., Lima, A. G. B., 2012, “Heat and Mass Transfer and Volume Variations during Drying of Industrial Ceramic Bricks: An Experimental Investigation”. Defect and Diffusion Forum, v. 326-328, pp. 267-272.
- Silva, J. B.; Almeida, G. S., Lima, W. C. P. B., Neves, G. A., Lima, A. G. B., 2011, “Heat and Mass Diffusion Including Shrinkage and Hygrothermal Stress during Drying of Holed Ceramics Bricks”. Defect and Diffusion Forum, v. 312-315, pp. 971-976.
- Silva, V. S., Lima, Delgado, I. M. P. O., W. M. P. B., Lima, A. G. B., 2016, “Heat and Mass Transfer in Holed Ceramic Material Using Lumped Model”, Diffusion Foundations, (Aceito para publicação).

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

HYDRO THERMAL ANALYSIS DURING THE DRYING OF A HOLED CERAMIC MATERIAL USING LUMPED ANALYSIS METHOD

Veralúcia Severina da Silva, veralucia.silva84@yahoo.com.br¹

Gustavo Igor da Silva, gustavoigor018@gmail.com²

Diniz Ramos de Lima Junior, diniz.junior@caruaru.ifpe.edu.br²

George Alberto Gaudêncio de Melo, george.gaudencio@caruaru.ifpe.edu.br²

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br¹

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima, wan_magno@hotmail.com¹

¹ Federal University of Campina Grande (UFCG), Zip Code 58429-900, Campina Grande-PB, Brazil.

² Federal Institute of Pernambuco (IFPE), Caruaru – PE, Zip Code 55870-000, Brazil

Abstract: *Drying is a thermodynamic process, in which there is simultaneous heat transfer and moisture removal of a porous material. Clay products when exposed to drying without control may suffer cracks and deformations, reducing its quality post-drying. This work aims to analyze the heat and mass transfer behavior in holed solid with arbitrarily form during drying using the lumped analysis method. Application was performed for drying of ceramic products. The analytical solution of the governing equations was made using the variable separation method. Kinetic results of mass loss and heating of ceramic parts for different conditions are presented and analyzed. It was observed that the moisture loss process occurs at a lower speed than heating the ceramic material, due to the fact that its thermal diffusivity to be greater than the mass diffusivity, and the temperature and body shape strongly affect heat and mass transport phenomena.*

keywords: *Drying, analytical, clay, heat, mass*