

## SECAGEM DE SÓLIDOS CERÂMICOS COM FORMA COMPLEXA VIA TÉCNICA ANALÍTICA

Elisiane Santana de Lima; Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima; Vital Araújo Barbosa de Oliveira

*Universidade Estadual da Paraíba, [limaelisianelima@hotmail.com](mailto:limaelisianelima@hotmail.com)  
Universidade Federal de Campina Grande, [wandersonmagno@hotmail.com](mailto:wandersonmagno@hotmail.com)  
Universidade Estadual da Paraíba, [vitaloliveira@uepb.edu.br](mailto:vitaloliveira@uepb.edu.br)*

**Resumo do artigo:** Os materiais cerâmicos são peças bastante utilizadas pela indústria civil e o seu processo de fabricação compreende diversas fases: exploração das jazidas, tratamento prévio das matérias primas, homogeneização, secagem e a queima. Aqui, ênfase será dada no estudo da secagem de sólidos cerâmicos, visto que, este é um processo termodinâmico de fundamental importância na qualidade do produto e redução de custo de fabricação. O processo de secagem consiste na remoção de umidade de um material através do aquecimento, envolvendo mecanismo simultâneo de transferência de calor e massa entre o material e o ar de secagem, sendo uma importante etapa na conformação de um material cerâmico e argiloso. Neste sentido, este trabalho objetiva a simulação da secagem de sólidos vazados e com forma arbitrária. Para descrever o processo de secagem de materiais porosos utilizou-se a técnica analítica. A aplicação tem sido feita para a secagem de materiais cerâmicos afim de obter resultados cinéticos de perda de massa e calor dos mesmos. Foram simulados diferentes casos variando-se a forma do corpo, de onde obteve-se as cinéticas de secagem (perda da umidade) e aquecimento do sólido (aumento de temperatura). A partir da análise dos resultados verificou-se que a secagem ocorre no período de taxa de secagem decrescente e sólido com relação área/volume mais elevada perde umidade e se aquece mais rápido. Apesar dos problemas apresentados devido à rápida secagem, e necessidade de um controle rigoroso do processo observou-se que o tempo de secagem nesta pesquisa foi muito longo.

**Palavras-chave:** Secagem; Calor; Massa; Geometria Complexa; Analítico.

### INTRODUÇÃO

Em termos teóricos pode-se definir a cerâmica como qualquer material inorgânico, não-metálico, obtido geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. São várias as matérias-primas das quais se podem produzir artigos cerâmicos. A fabricação da cerâmica como atividade industrial, ocorreu devido ao crescimento das grandes construções. Praticamente toda a Europa herdou as práticas trazidas pelos povos antigos, tais como romanos, bizantinos, árabes, entre outros, que influenciaram fortemente no estilo das construções nesses continentes. O surgimento das primeiras máquinas moldadoras para fabricação de material cerâmico, movimentados por força animal ocorreu por volta de 1850, sendo mais tarde substituídas por máquinas a vapor e possibilitando, assim, o aumento significativo da produção. Pode-se considerar esse fato como sendo o primeiro grande salto para a indústria da cerâmica vermelha, pois possibilitou a fabricação de peças especiais e dos tijolos ocos ou furados (Steil, 2000).

Até o século XIX, os sistemas de produção não se modificaram muito. A produção permaneceu manual, a secagem era realizada ao sol e a queima em fornos trapezoidais. Sucessivamente, com o desenvolvimento das primeiras máquinas motrizes à vapor, foi possível mecanizar as operações de extração de matérias primas, preparação e conformação e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de produção. Com o desenvolvimento tecnológico da indústria cerâmica passaram a ser construídos blocos vazados de grande resistência mecânica, mais leve, inclusive, que os antigos materiais cerâmicos maciços (Lucena,2014).

Atualmente, a cerâmica de construção brasileira ocupa um lugar de destaque na economia do país. Durante um longo período de produção de materiais cerâmicos não ocorreram mudanças tecnológicas importantes. Somente nas últimas décadas é que a tecnologia de fabricação de materiais cerâmicos passou por um processo de desenvolvimento associado a inovações. Mesmo assim, é natural que outros processos e inovações ainda ocorrerão. No entanto, considerando também as variáveis operacionais, se torna cada vez mais importante, quando se considera produtividade e qualidade, o conhecimento, em especial por parte dos técnicos e engenheiros envolvidos no processo produtivo, das variáveis de controle do processo (Lucena,2014).

A necessidade de investimento na melhoria de qualidade e produtividade é uma preocupação crescente do setor. A materialização desta tendência vem sendo realizada ainda lentamente, através de novas técnicas de gestão e, principalmente, pela introdução de projetos mais atualizadas e eficientes, observadas em algumas fábricas de blocos cerâmicos estruturais e de telhas. O setor industrial da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolante térmicos (Avelino, 2008).

A secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução da umidade do sólido, mediante o fornecimento de energia ao mesmo. É uma fase do processo que antecede a queima, e que demanda uma quantidade apreciável de energia térmica, para evaporar a água, de forma lenta e uniforme, que foi adicionada durante o processo de moldagem. O objetivo desta etapa é a redução do teor de umidade dos produtos. O transporte de umidade, do interior para a superfície do material pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do produto e do percentual de umidade presente. A duração da secagem é função das condições de estado do ar atmosférico (temperatura e umidade relativa) e da ventilação do local, podendo chegar a períodos de até seis semanas. A

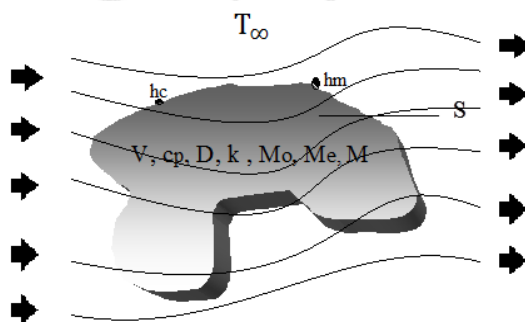
secagem artificial é realizada em câmaras de secagem ou estufas, aproveitando, via de regra, o calor residual dos fornos, quando o mesmo resfria. O período da secagem artificial depende das características da matéria-prima, do formato das peças e do tipo do secador. O controle do processo de desumidificação e o conhecimento do mecanismo do movimento de umidade são fundamentais, uma vez que com dados de simulação e/ou experimental, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia.

Atualmente existem diversos problemas que ocorrem durante o processo de secagem de materiais cerâmicos a serem resolvidos. Com a secagem feita de forma incorreta, a retirada de água da peça fica sem controle, o que pode causar danos estruturais como trincas, deformações, empenamentos e, conseqüentemente, uma grande perda de produtos. Controlar o processo de secagem, ou seja, conhecer o mecanismo da transferência de umidade e calor é de fundamental importância para a indústria cerâmica (Lucena,2014). Sendo assim, este trabalho propõe um estudo que busca a otimização e controle do processo de retirada de água e aquecimento dos materiais cerâmicos. Seu objetivo é o estudo de secagem de materiais cerâmicos furados e com forma complexa usando o método da análise concentrada.

## METODOLOGIA

O método da capacitância global (Incropera e de Witt,2002) admite uma distribuição uniforme de massa e ou temperatura dentro do sólido em qualquer instante, de tal modo que, a temperatura ou teor de umidade do sólido seja dado exclusivamente em função do tempo.

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



**Figura 1** - Esquema representativo do processo de secagem de um sólido com geometria arbitrária.

- **Análise da transferência de massa**

$$V \frac{d\bar{M}}{dt} = -h_m S (\bar{M} - \bar{M}_e) + \dot{M}V \quad (1)$$

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:

$$\frac{(\bar{M} - \bar{M}_e) - \frac{MV}{h_{m1}S_1 + h_{m2}S_2}}{(\bar{M}_0 - \bar{M}_e) - \frac{MV}{h_{m1}S_1 + h_{m2}S_2}} = \text{Exp} \left[ \left( \frac{-h_{m1}S_1 - h_{m2}S_2}{V} \right) t \right] \quad (2)$$

- **Análise da transferência de calor e massa simultânea**

$$\rho V \frac{d\bar{\theta}}{dt} = \frac{h_{c1}S_1(\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}) + h_{c2}S_2(\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}) + \rho_s V \frac{d\bar{M}}{dt}(h_{fg} + c_v(\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}))}{c_p} + \frac{\dot{q}V}{c_p} \quad (3)$$

Usando a condição  $\bar{\theta}(t=0) = \bar{\theta}_0$  inicial obtém-se:

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_\infty - \left[ (\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}_0) + \left( \frac{b}{a-c} + \frac{d}{a} \right) \right] e^{-at} + \left( \frac{b}{a-c} e^{-ct} + \frac{d}{a} \right) \quad (4)$$

Onde:

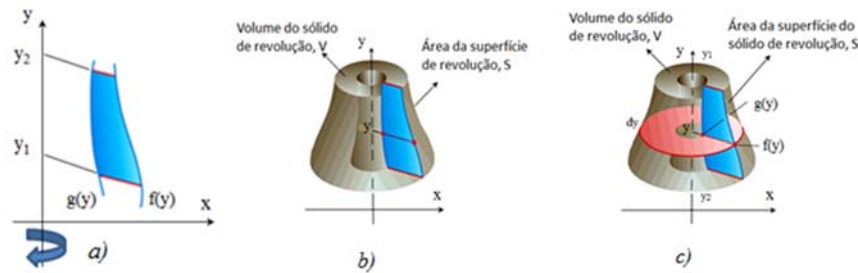
$$a = \frac{(h_{c1}S_1 + h_{c2}S_2)}{\rho V c_p} \quad (5)$$

$$b = \frac{\rho_s h_{fg}}{\rho c_p} [(-h_{m1}S_1 - h_{m2}S_2)(\bar{M}_0 - \bar{M}_e) + \dot{M}V] \quad (6)$$

$$c = \frac{-h_{m1}S_1 - h_{m2}S_2}{V} \quad (7)$$

$$d = \frac{\dot{q}}{\rho c_p} \quad (8)$$

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).



**Figura 2-** a) Região Plana, b) Revolução da região plana, e c) sólido de revolução.

A base do 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:

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

Nesta pesquisa adotou-se:

$$f(y) = a^m \left[ 1 - \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{m}} \quad (10)$$

$$g(y) = a' = \text{constante} \quad (11)$$

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

A área de superfície do sólido 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:

$$S_1 = \int_{y_1}^{y_2} 2\pi f(y) \sqrt{1 + [f'(y)]^2} dy + \pi \{ [a^m (1 - \frac{b'}{b})^2]^{1/m} \}^2 - (a')^2 \} + \pi [a^2 - (a')^2] \quad (12)$$

$$S_2 = \int_{y_1}^{y_2} 2\pi g(y) \sqrt{1 + [g'(y)]^2} dy \quad (13)$$

$$S = S_1 + S_2 \quad (14)$$

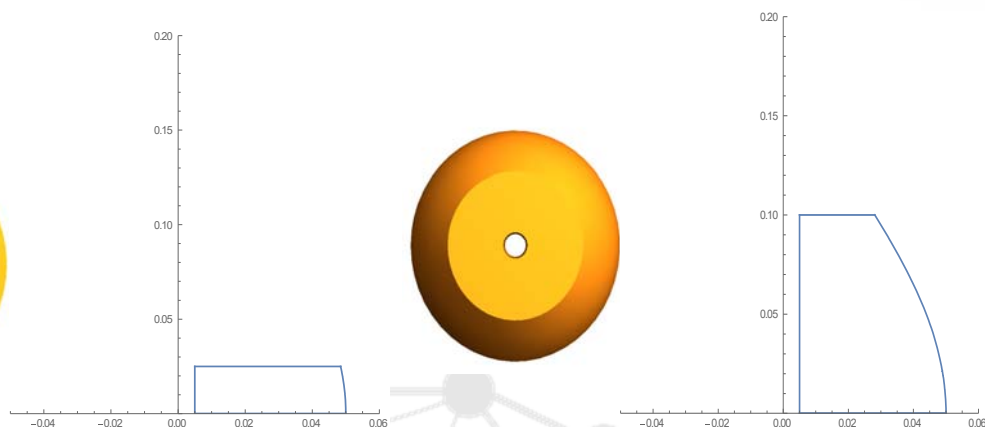
Para uma melhor análise dos parâmetros que compõem as Equações (2) e (4), as mesmas, assim como as Equações (9) a (14), foram resolvidas com o auxílio do software Mathematica<sup>®</sup>. Toda a formulação foi aplicada para descrever a secagem de sólidos argilosos. Os resultados foram expostos na forma gráfica utilizando o software Grapher<sup>®</sup>. A metodologia empregada para a geração dos resultados, foi a da variação dos parâmetros  $m$ ,  $b'$  e  $a'$ , um a um, mantendo-

se constantes os demais parâmetros. A Tabela 1 a seguir, contém todos os casos estudados nesta pesquisa.

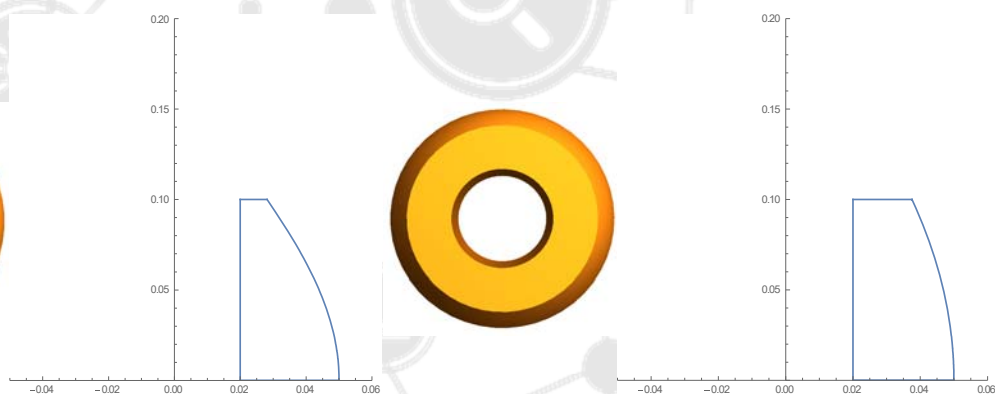
**Tabela 1:** Valores dos parâmetros geométricos do sólido de revolução.

Caso	a (m)	b (m)	m	b' (m)	a' (m)
1	0,05	0,2	0,5	0,025	0,005
2	0,05	0,2	0,5	0,050	0,005
3	0,05	0,2	0,5	0,075	0,005
4	0,05	0,2	0,5	0,100	0,005
5	0,05	0,2	0,5	0,025	0,010
6	0,05	0,2	0,5	0,025	0,015
7	0,05	0,2	0,5	0,025	0,020
8	0,05	0,2	0,5	0,100	0,020
9	0,05	0,2	1,0	0,025	0,005
10	0,05	0,2	1,0	0,100	0,020
11	0,05	0,2	2,0	0,025	0,005
12	0,05	0,2	2,0	0,100	0,020
13	0,05	0,2	4,0	0,025	0,005
14	0,05	0,2	4,0	0,050	0,005
15	0,05	0,2	4,0	0,075	0,005
16	0,05	0,2	4,0	0,100	0,005
17	0,05	0,2	4,0	0,100	0,010
18	0,05	0,2	4,0	0,100	0,015
19	0,05	0,2	4,0	0,100	0,020

Abaixo encontram-se os quatro casos mais impactantes das dezenove geometrias dos sólidos estudados nesta pesquisa.



**Figura 3:** Caso 1 e Caso 4.

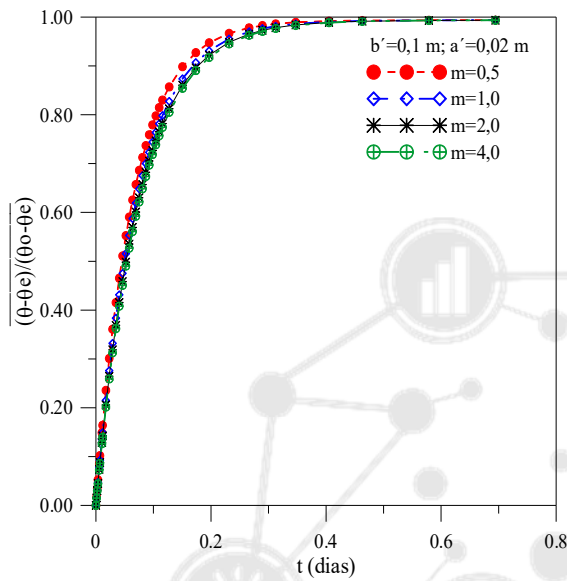


**Figura 4:** Caso 8 e Caso 10.

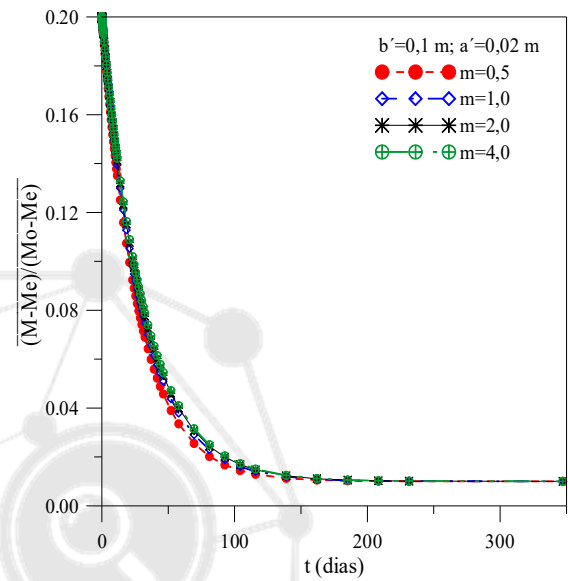
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram simulados dezenove diferentes casos variando-se a forma do corpo, de onde obteve-se as cinéticas de secagem (perda da umidade) e aquecimento do sólido (aumento de temperatura). De modo que, foi possível compreender melhor o processo de transferência de calor e massa durante o processo de secagem de peças cerâmicas.

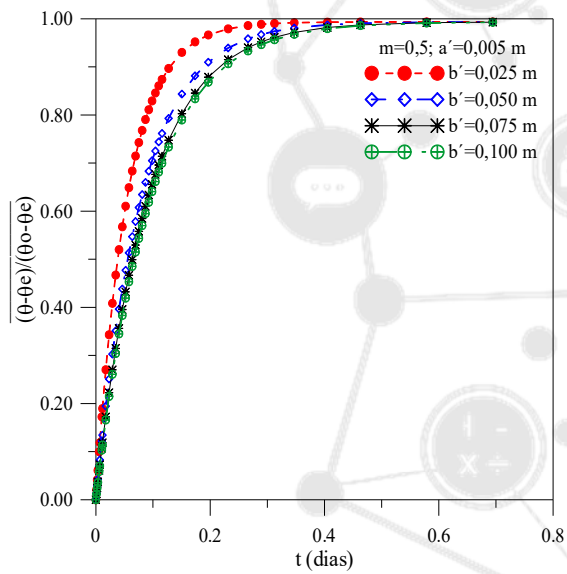
Analisando as figuras 6, 8, 10 e 12, pode-se perceber a influência do parâmetro  $b'$  que representa a variação da altura do sólido em estudo. A figura 8, ilustra a influência do parâmetro  $a'$  que representa a variação do diâmetro do furo central. As Figuras 6 e 10 ilustram a influência do parâmetro  $m$ , que representa a variação da curva gerada pela equação (10).



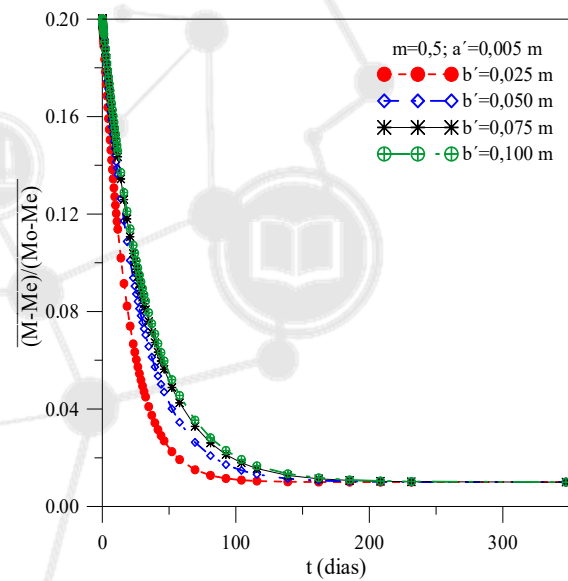
**Figura 5:** Temperatura em função do tempo com  $m$  variável (Caso 8).



**Figura 6:** Teor de umidade em função do tempo com  $m$  variando (Caso 8).

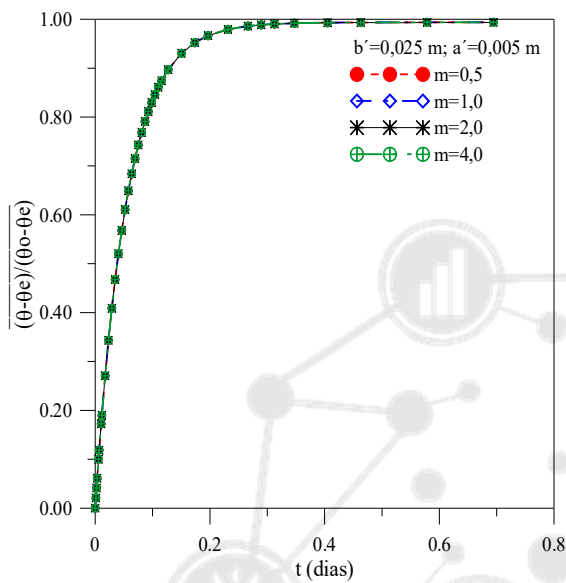


**Figura 7:** Temperatura em função do tempo para diferentes sólidos de revolução com  $m = 0,5$  (Casos 1, e 4).

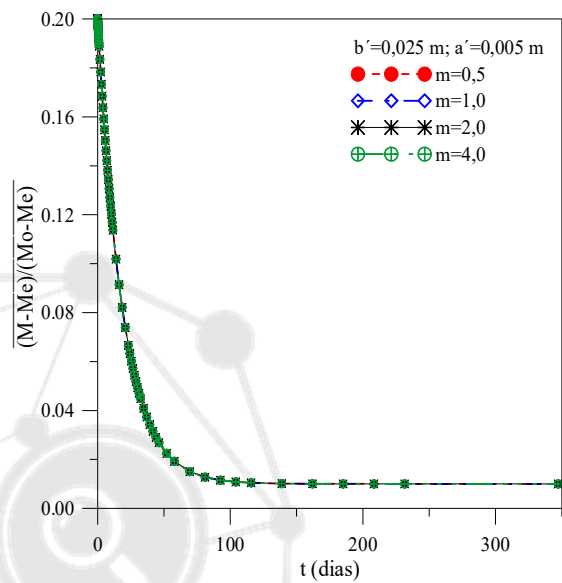


**Figura 8:** Teor de umidade em função do tempo para diferentes sólidos de revolução com  $m = 0,5$  (Casos 1, e 4).

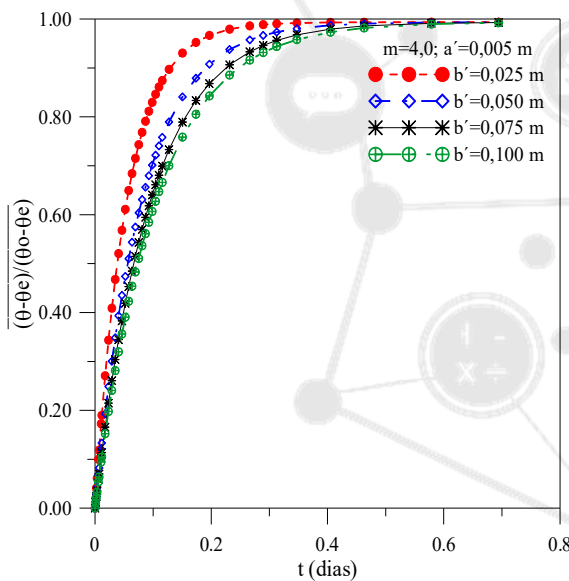




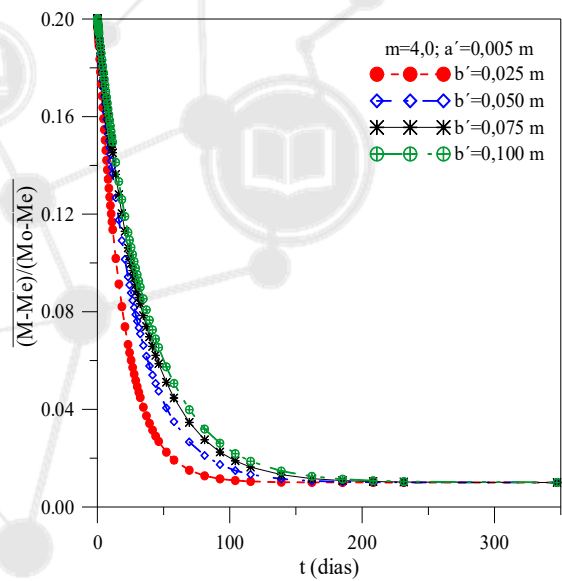
**Figura 9:** Temperatura em função do tempo para diferentes sólidos de revolução com  $m$  variável (Casos 1, 9, 11 e 13).



**Figura 10:** Teor de umidade em função do tempo para diferentes sólidos de revolução com  $m$  variando (Casos 1, 9, 11 e 13).



**Figura 11:** Temperatura em função do tempo para diferentes sólidos de revolução com  $m = 4,0$  (Casos 13, 14, 15 e 16).



**Figura 12:** Teor de umidade em função do tempo para diferentes sólidos de revolução com  $m = 4,0$  (Casos 13, 14, 15 e 16).

Analisando os gráficos das cinéticas de secagem da massa, verifica-se que a influência do parâmetro  $b'$  na cinética de secagem dos sólidos

cerâmicos, é mais significativa do que a do parâmetro  $a'$  (diâmetro do furo), fixado a forma do corpo. O efeito do parâmetro  $a'$  é menos influente quando os parâmetros  $m$  e  $b'$  assumem os menores valores. E ainda, a influência do parâmetro  $m$ , no processo de secagem é pequena quando comparada com os demais parâmetros. Isto é, as curvas apresentam o mesmo comportamento, com os valores do teor de umidade muito próximos. Quando se aumenta o parâmetro  $m$  ao máximo tem-se uma leve diferença do teor de umidade comparado com o parâmetro  $m$  mínimo, isto é, os comportamentos das curvas de secagem possuem uma diferença relativamente baixa entre os valores do teor de umidade ao longo do processo.

Sob outra perspectiva, os gráficos da temperatura mostram a cinética de aquecimento que corresponde a resultados do comportamento de temperatura em função do tempo para os dezenove tipos de geometrias (casos de 1 a 19). Analisando estas figuras, percebe-se que os sólidos atingem a temperatura do ar de secagem (equilíbrio térmico) mais rapidamente se comparada a transferência de massa. Tal comportamento se deve ao fato de que o coeficiente de difusão de massa no sólido é muito menor que difusividade térmica. Quando o sólido entra em equilíbrio térmico com o ar de secagem, o processo de transferência de massa no interior do sólido ocorre de forma isotérmica. Isto ocorre a partir da primeira hora do processo.

## CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados verificou-se que a secagem ocorre no período de taxa de secagem decrescente. Foi verificado ainda que, sólido com relação área/volume mais elevada perde umidade e se aquece mais rápido.

Apesar dos problemas apresentados devido ao rápida secagem, e necessidade de um controle rigoroso do processo observou-se que o tempo de secagem nesta pesquisa foi muito longo. O método da capacitância global envolve um controle rigoroso no que diz respeito aos problemas relacionados com a secagem de materiais cerâmicos, mas possui uma grande desvantagem, o custo do processo seria elevado quando comparada aos métodos de secagens utilizadas atualmente .

Neste trabalho foi proposto a modelagem matemática para o processo de secagem em materiais cerâmicos de forma geométrica arbitrária, na qual foi aplicada a 3ª condição de contorno (condução convectiva). A solução analítica das equações governantes tem sido apresentada. A formulação pode ser aplicada à sólidos de diferentes geometria e material, em diferentes condições de ar de secagem. Ênfase foi dada ao material cerâmico. Dos resultados obtidos considerou-se que sólido com maior relação área/volume perdem umidade mais rápido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVELINO, D. O. **Estudo experimental da secagem de tijolos cerâmicos vazados industriais**, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book, 1992, 450 p.

DA SILVA, W. P., RODRIGUES, A. F., SILVA C. M. D. P. S, DE CASTRO D. S., GOMES J. P. 2015. **Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes**. J Food Engr 166:230–6. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.06.018.

INCROPERA, F. P.; De WITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: J. Wiley & Sons, 2002.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas**. 1999. 256 p. Tese de Doutorado, UNICAMP, S.P,

LIMA, L. A., SILVA, J. B., LIMA, A. G. B. **Transferência de calor e massa durante a secagem de sólidos com forma arbitrária: uma abordagem concentrada**. Engenharia Agrícola *JCR*, Jaboticabal, v. 23, n.1, p. 150-162, 2003.

Lima, W. M. P. B. **Transferência de Calor e Massa em Materiais Cerâmicos com Forma Complexa Via Método da Capacitância Global**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Centro de Ciências e Tecnologia Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, Brasil, 2014, 23p.

LUCENA, C. G. **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, 2014.

MARIZ, T. F. **Secagem da casca de caroço de algodão em leito fixo**. Campina Grande: Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 1986. 139p. Dissertação (Mestrado).

MUNEM, M. A., FOULIS, D. J., **Cálculo**, 1978, New York. V. 1, p. 353, 369-376.

SILVA, J. B. **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, 2002.

SILVA, S. V. **Transferência de Calor e massa em Materiais com Forma Complexa via Método da Análise Concentrada Estudo de Caso: Secagem de Materiais Cerâmicos**. Dissertação (Doutorado em Engenharia de processos). Pós-graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande- PB, Brasil, 2016.

STEIL, M. C. **Fabricação de Produtos Cerâmicos**. In 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2000. São Pedro. Anais, São Paulo: Associação Brasileira de cerâmica. 1 CD.