

## **TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM MATERIAIS CERÂMICOS VAZADOS COM GEOMETRIA COMPLEXA VIA TÉCNICA ANALÍTICA**

Elisiane de Lima 1; Wanderson de Lima 2; Vital Oliveira 3; Severino Farias Neto 4; Antonio de Lima 5

1 Universidade Estadual da Paraíba, limaelisianelima@hotmail.com

2 Universidade Federal de Campina Grande, wan\_magno@hotmail.com

3 Universidade Estadual da Paraíba, vitaloliveira@uepb.edu.br

4 Universidade Federal de Campina Grande, s.fariasn@gmail.com

5 Universidade Federal de Campina Grande, antonio.gilson@ufcg.edu.br

### **Introdução**

Conceitualmente, 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).

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 tijolos, visto que ela é um processo termodinâmico de fundamental importância na qualidade do produto e redução de custo de fabricação.

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.

As equações que compõem o modelo são: a) Balanço de massa: Aplicando o balanço de massa num elemento infinitesimal na superfície do sólido, em qualquer sistema de coordenadas, assumindo propriedades termo físicas constantes e variações dimensionais desprezíveis, tem-se a equação da conservação da massa. Assim, usando a condição inicial  $M(t=0)=M_0$ , e separando as variáveis da equação encontrada e integrando-a desde a condição inicial, tem-se como resultado a equação do teor de umidade em função do tempo aplicado em um corpo qualquer. b) Balanço de energia: Para a análise da transferência de calor, pode-se realizar analogia a transferência de massa e assumir que na superfície do sólido ocorre simultaneamente convecção térmica, evaporação e aquecimento do vapor produzido. Realizando a substituição das equações encontradas no balanço de massa no balanço de energia, encontra-se uma equação diferencial ordinária de primeira ordem, não-linear e não-homogênea. Para simplificar a equação do balanço de energia desconsidera-se a energia necessária para aquecer o vapor d'água desde a temperatura na superfície do sólido até a temperatura do fluido, podendo-se encontrar a solução analítica resolvendo-a a partir do método de Leibniz, via fator integrante, usando a condição inicial  $T(t=0)=T_0$ . Como resultado tem-se a equação da temperatura do sólido em função do tempo.

Para encontrar o volume dos corpos cerâmicos em estudo nessa pesquisa foi utilizado o método dos anéis circulares em sólidos de revolução (Munem e Foulis,1978). 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), onde  $f$  e  $g$ , descrevem as fronteiras externa e interna do sólido, respectivamente.

Para a obtenção dos resultados simulados, foi utilizado software Mathematica®. Os resultados foram expostos na forma gráfica utilizando o software Grapher®.

### Resultados e discussão

Foram simulada diferente 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. 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

### Conclusões

Neste trabalho foi proposto a modelagem matemática para o processo de secagem em materiais cerâmicos de forma geométrica arbitraria, 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 conseidera-se que sólido com maior relação área/volume perdem umidade mais rápido.

**Palavras-Chave:** Secagem, Analítico, Analise Concentrada, Materiais cerâmicos

### Fomento

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e CNPQ/PIBIC/UEPB, pelo apoio financeiro.

### Referências

- INCROPERA, F. P.; De WITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: J. Wiley & Sons, 2002.
- LUCENA, C. G. **Transporte de massa durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados via volumes finitos**, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- MUNEM, M. A., FOULIS, D. J., **Cálculo**, 1978, New York. V. 1, p. 353, 369-376.
- 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.
- STEIL, O. S. **Energia do gás natural em fornos de cerâmica estrutural**. Florianópolis: SCGÁS, jul. 2000. (Projeto).