

ESTUDO DO TRANSPORTE DE MASSA NUMA PLACA CERÂMICA VIA MÉTODO GBI

Valeska Barbosa de Brito¹
Lindalva Izidro da Silva²
José Rodrigues da Silva³
Márcia Ramos Luiz⁴
Ivoneete Batista dos Santos⁵

RESUMO

Em indústrias de materiais cerâmicos, o procedimento de secagem é frequentemente utilizado, pois equivale a separação da parte líquida e sólida de um determinado corpo poroso. O processo de secagem envolve dois fenômenos análogos e simultâneos: a transferência de calor e a transferência de massa. Sendo de suma importância ter conhecimento sobre a secagem para garantir a redução do conteúdo de umidade e evitar danos ao produto final. Para estudar, analisar e comparar os resultados da transferência de massa numa placa plana cerâmica, consideramos os seguintes dados experimentais reportados na literatura de (SANTANA, 2006), temperatura e UR iguais a 80°C e 6,0%, respectivamente, teor de umidade inicial $\varphi_0 = 0,994$ e teor de umidade equilíbrio $\varphi_e = 0,000935$. Para isso, utilizamos o método integral baseado em Galerkin, método GBI, a condição de contorno de 1ª espécie e propriedades termo-físicas constantes. Para simular a solução do problema físico, utilizamos um código computacional na plataforma Mathematica®, versão 7.0, e através de mais softwares não comerciais construímos as curvas da cinética de secagem, que nos permitiu a análise do processo ao longo do tempo. Ao comparar os resultados alcançados percebemos que o método integral baseado em Galerkin, foi efetivo para descrever a transferência de massa na placa estudada.

Palavras-chave: Transferência de Massa, Simulação, Placa, Método GBI.

INTRODUÇÃO

A fabricação da cerâmica como prática industrial, ocorreu devido ao crescimento das grandes construções. Corpos cerâmicos são amplamente utilizados pela população desde a antiguidade devido a suas inúmeras funções, podendo ser usados como placas, tijolos e telhas nas construções civis, conforme a necessidade e finalidade. Em indústrias de materiais cerâmicos, o procedimento de secagem, que envolve a transferência de calor e massa é

¹Graduanda do Curso de Engenharia Sanitária e ambiental da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, valeskabarboza15@gmail.com;

²Graduanda do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, lindalvaizidro30@gmail.com;

³Graduando do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, joserodrigues.1610ds@gmail.com;

⁴Professora do Departamento de Eng. Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, marciarluiz@servidor.uepb.edu.br;

⁵Professora/orientadora do Departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, ivoneeteb@gmail.com.

frequentemente utilizado, pois equivale a separação da parte líquida e sólida de um determinado corpo poroso.

Tendo em vista que o transporte de massa é delineado por meio da teoria da difusão líquida, baseado na segunda lei de Fick (Incropera e De Witt, 2008), a secagem tem como propósito retirar a umidade presente no interior de um sólido através do processo de difusão, no qual, as moléculas de água migram da parte interior para a exterior do corpo e por evaporação na superfície do mesmo. A extração de moléculas de água na secagem ocorre pela movimentação do líquido, devido aos gradientes de pressões parciais de vapor d'água entre a superfície do material e o ar do ambiente que o contorna (SILVA, 2009).

Ao longo de todo o processo de secagem, é de muita importância ter conhecimento sobre temperatura, velocidade e umidade do ar, para garantir uma transferência de massa contida e uniforme do produto (SANTANA, 2006), de modo que danos irremediáveis provenientes de uma secagem irregular que pode ocasionar a perda da qualidade do produto final, seja evitado. Durante o transporte de massa, também se faz necessário conhecer a forma estrutural do sólido para que o modelo matemático adotado retrate os fenômenos físicos de uma maneira eficiente (SANTOS et al., 2011), evitando a ocorrência de deformações, empenamentos, fissuras e trincas na superfície do sólido, contribuindo para a boa qualidade do produto.

Este trabalho tem como finalidade, estudar o transporte de massa em uma placa plana cerâmica, empregando a teoria da difusão líquida e o método integral baseado em Galerkin, chamado método GBI (método da física-matemática que oferece a base teórica para os métodos de elementos finitos) considerando a condição de contorno 1ª espécie e propriedades termo-físicas constantes, e simular através de um code computacional a variação desse transporte de massa dentro da placa plana de dimensões (120 x 60) cm² seca nas seguintes condições: temperatura 80°C, umidade relativa do ar 6,0%, teor de umidade inicial $\varphi_0 = 0,994$ e de equilíbrio $\varphi_e = 0,000935$. Os resultados da cinética de secagem e do teor de umidade admissional alcançados através das simulações, serão exibidos, discutidos, analisados e comparados com os dados experimentais de (SANTANA, 2006).

METODOLOGIA

De acordo com (BROOKER et al. 1992 e Incropera e De Witt, 1990) a transferência de massa ocorre de forma natural, por meio do fluxo de massa procedente da diferença de concentração entre o corpo e o ar da secagem. Tendo em vista que, a difusão líquida está presente em processos físicos, e é definida como um processo que ocorre onde as partículas

estão mais concentradas, para regiões onde sua concentração é menor, ou seja, a difusividade de massa equivale ao transporte de moléculas no interior da placa alcançando a posição de equilíbrio estável (SILVA, 2010). Na teoria da difusão líquida, a 2ª lei de Fick tem sido utilizada para estabelecer a transferência de massa em modelos matemáticos. Para a modelagem do processo de transferência de massa na placa plana cerâmica, foram inseridas as seguintes condições:

- (a) a placa é homogênea e isotrópica;
- (b) a distribuição de umidade no interior da mesma é uniforme no início do processo;
- (c) as propriedades termo-físicas são constantes durante todo o processo;
- (d) a placa é constituída de matéria seca e água na fase líquida;

(e) o transporte de massa ocorre por difusão da umidade e condução do calor no interior da placa, bem como da evaporação da umidade na superfície da mesma.

Para simular o processo de transferência de massa da placa em estudo, foi criado um código computacional, seguindo o protocolo proposto pela plataforma Mathematica®, versão 7.0 (WOLFRAM, 2009).

REFERENCIAL TEÓRICO

A argila é um material usado na produção de objetos cerâmicos. A mesma possui uma textura granulosa e é formada principalmente de componentes inorgânicos, como: sais, água, algumas impurezas e poucos componentes orgânicos. Desses componentes, apenas os minerais são aproveitados para produzir diversos produtos cerâmicos com finalidades diferentes. Com relação ao nível térmico, de acordo com Santana (2006), as análises térmicas desempenham grande relevância na caracterização das argilas como tal, demonstram as reações e as transformações que ocorrem durante o aquecimento do material.

O setor cerâmico brasileiro ocupa o terceiro lugar com maior produção mundial e a segunda posição em consumo.

Para explicar a variação da temperatura e da umidade na placa cerâmica, aplicamos a 2ª lei de Fick, que é representada pela seguinte equação:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (1)$$

na qual: M é o teor de umidade da placa que varia em função do tempo e D é o coeficiente de difusão. A solução da Equação (1) de acordo com (PAYNE et al., 1986), é dada por:

$$M(x,y) = \sum C_n \psi_n(x,y) e^{-\gamma_n t} + M_e \quad (2)$$

onde C_n é a n -ésima constante a ser determinada, ψ_n é a n -ésima autofunção, γ_n é o n -ésimo autovalor e M_e é o teor de umidade de equilíbrio.

Consideramos C_n , γ_n , M_e e D constantes e ψ_n independente do tempo, onde no ψ_n é uma função obtida através de uma combinação linear de um conjunto de funções de base. Dada por:

$$\psi_n = \sum d_{nj} f_j \quad (3)$$

Após a utilização do método de Galerkin, que consiste em multiplicar certa equação diferencial por $f_i dV$ e integrar sob o volume (KANTOROVICH; KRYLOV, 1960), também utilizamos o método de Cholesky para expressar a resolução do problema na forma matricial:

$$(\bar{A} + \gamma_n \bar{B}) \bar{d}_n = 0 \quad (4)$$

onde \bar{A} e \bar{B} são matrizes quadradas de $N \times N$ elementos, calculadas utilizando as equações a seguir:

$$a_{ij} = \frac{1}{v} \int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV \quad (5.a)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{v} \int_V f_i f_j dV \quad (5.b)$$

Através dos valores das matrizes \bar{A} e \bar{B} , obtivemos os valores de γ_n e \bar{d}_n . E para obtenção dos coeficientes C_n que aparecem na Equação (2), foi aplicado antes a condição de contorno de 1ª espécie e usando a condição inicial em $t = 0$ e $M = M_0$, obtivemos a seguinte equação:

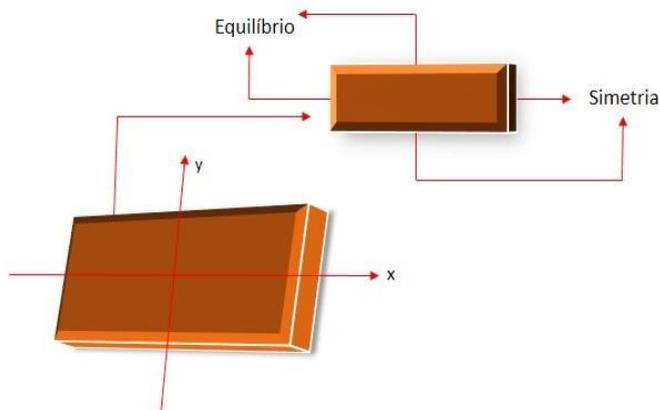
$$M_0 = \sum C_n \psi_n + M_e \quad (6)$$

Com mais alguns artifícios matemáticos, ao aplicar novamente o método de galerkin, foi possível solucionar o problema encontrando os valores de C_n . Desta maneira, o valor médio do teor de umidade no interior da placa é dado pela equação:

$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_V M dV \quad (7)$$

onde V é o volume da placa cerâmica, representada a seguir pela Figura 1:

Figura 1: Representação da placa plana cerâmica estudada



Fonte: Próprio Autor

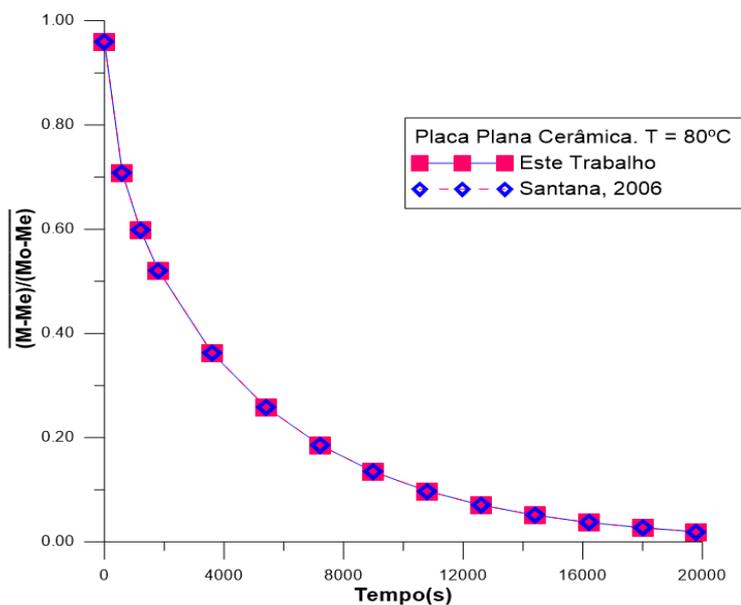
O contorno da placa é dado pela função de base (SANTOS, 2013):

$$f_j^{(1)} = (a^2 - x^2) \cdot (b^2 - y^2) \cdot x^{(i-j)} \cdot y^j \quad (8)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2, utilizada para validar este trabalho, mostra a cinética de secagem considerando a condição prescrita à temperatura de 80°C e a coerência entre os valores dos teores de umidade experimentais adquiridos para a placa cerâmica por (SANTANA, 2006).

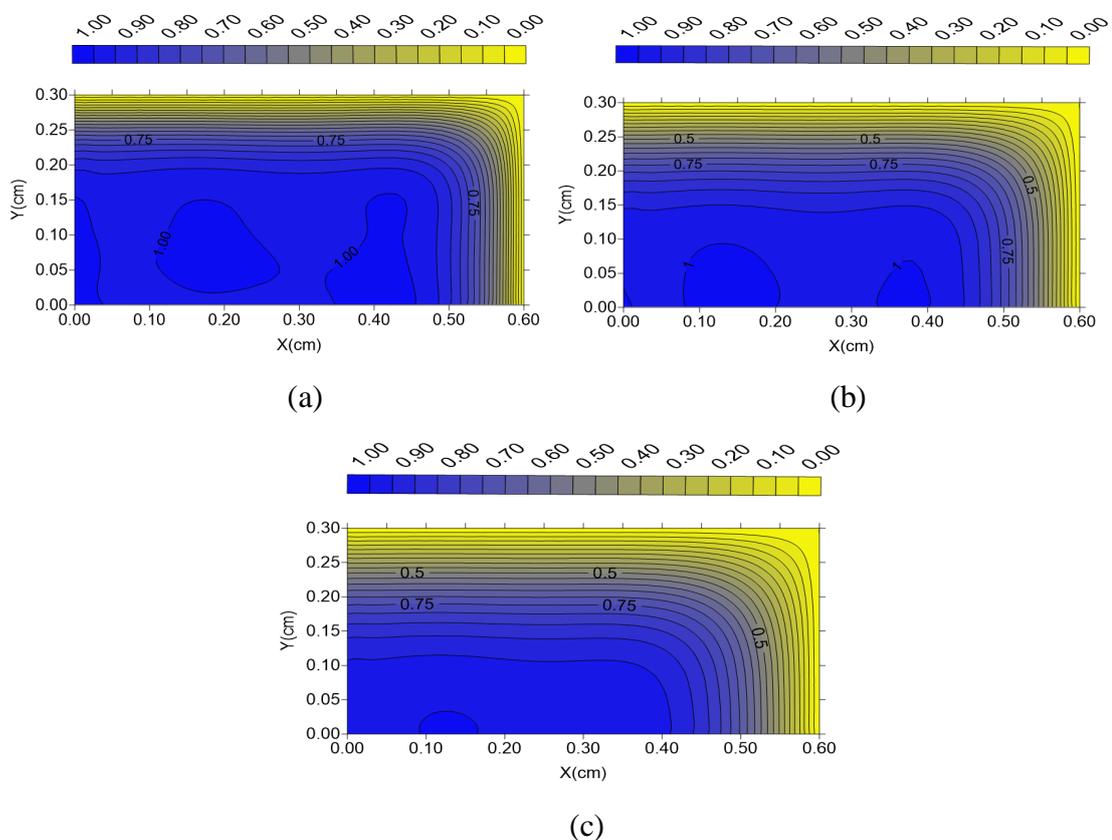
Figura 2: Teor de umidade médio adimensional em função do eixo.



Ao observar a Figura 2, pode-se perceber que há coerência entre os valores dos teores de concentração de água experimentais com os valores simulados, através dos pontos nas curvas de secagem que ficaram alinhados. Percebemos que com o passar do tempo, o teor de umidade adimensional vai diminuindo, chegando a se estabilizar a partir dos 4000 s. Para construção da cinética de transferência de massa, foi utilizado a plataforma Grapher, que possibilitou a análise e comparação entre os resultados adquiridos no presente trabalho com os valores experimentais da literatura de (SANTANA, 2006).

A Figura 3, ilustra a distribuição do teor de umidade adimensional dentro da placa cerâmica em três instantes simulados no processo de transferência de massa, quais seja: $t = 300$ s, $t = 600$ s e $t = 900$ s.

Figura 3 - Distribuição do teor de umidade adimensional no interior da placa para os seguintes tempos simulados: (a) 300 s, (b) 600 s e (c) 900 s respectivamente:



A partir da Figura 3, é notável a existência de um gradiente de concentração de água durante o processo de transporte de massa, onde seu nível é maior no início do processo por estar mais próximo do ar de secagem e vai diminuindo com o tempo, devido a variação de temperatura. Neste processo, o fluxo de umidade ocorre do centro para a superfície da placa. As áreas que apresentam maior perda de água possuem os maiores gradientes de umidade, pois a secagem é mais rápida nas extremidades da placa. Por isso a importância de ter uma secagem controlada, para não haver risco da perda do produto. A elaboração das curvas de transferência de massa foram realizadas através da plataforma Surfer versão 10, que possibilitou a análise do processo ao longo do tempo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao concluir este trabalho, percebemos que o método integral baseado em Galerkin, foi efetivo para descrever a transferência de massa na placa plana cerâmica, envolvendo a teoria de difusão líquida considerando a condição de contorno de 1ª espécie. A validação se obteve na comparação dos dados experimentais com os dados obtidos. Para a distribuição do teor de umidade adimensional, se tem maior valor no início da secagem e com o decorrer do tempo esse valor vai reduzindo até se obter estabilidade. Assim, podemos observar a variação de umidade que ocorre do interior para o exterior do sólido, no qual é preciso um controle minucioso durante todo o processo, para prever resultados e escolher a melhor alternativa para acontecer a transferência de massa, evitando qualquer dano ao produto final.

REFERÊNCIAS

- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; Hall, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: The AVI, 1992. 450 p.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 3ª edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 1990.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 6ª edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 2008.
- KANTOROVICH, L. V. e KRYLOV, V. I., **Approximate methods of higher analysis. Advanced Calculus**, Wiley, New York, USA, 1960.
- PAYNE, F. R., CORDUNEANU, C. C., HAJI-SHEIKH, A, e HUANG, T., **Integral methods in science and engineering. Chapter: On solution of parabolic partial differential equations using Galerkin functions**. Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA, 1986.
- SANTANA, E.W. F. **Avaliação da secagem e queima de placas cerâmicas**, Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2006.

SANTOS, I. B. **Transporte de calor e massa em sólidos com forma arbitrária no Método Integral Baseado em Galerkin: Modelagem e Simulação.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 164 p. 2013.

SILVA, J. B. **Simulação e Experimentação da Secagem de tijolos Cerâmicos Vazados,** Tese (Doutorado em engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 174 p., 2009.

SILVA, C. K. F da. Estimação de parâmetros de secagem de alimentos - Formulação de Luikov e uso da transformada integral generalizada. 2010. 125p. Tese (Doutorado), UFPB, João Pessoa – PB.

WOLFRAM, S., **The Mathematica® Book.** Cambridge University Press, New York, 2009.