

## SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE MASSA EM PLACAS PLANAS CERÂMICAS VIA SOFTWARE NÃO COMERCIAL

José Rodrigues da Silva<sup>1</sup>  
Rafael Teles Cruz Silva<sup>2</sup>  
Nórton Leonardo Teodório Rafael<sup>3</sup>  
Ivonete Batista dos Santos<sup>4</sup>

### INTRODUÇÃO

Atualmente, nosso cotidiano está diferente devido ao impacto da pandemia, Covid -19, em nossa vida social, profissional e pessoal, trazendo novos desafios e maneiras de se comunicar, trabalhar e estudar. Neste sentido, a educação foi um dos setores mais afetados, pois professores e alunos tiveram que se adaptar e se reinventar a nova realidade, onde o ensino remoto trouxe-nos uma solução para amenizar a situação que se alastrou sobre todo o setor educacional.

Segundo Garcia (2013), vivemos em uma nova era tecnológica, na qual todos os aspectos da sociedade estão sendo beneficiados pelos aparatos digitais e tecnológicos suprindo as necessidades de cada área da sociedade. A educação está inserida nessas contribuições da tecnologia para melhor desenvolvimento de ensino/aprendizagem, proporcionando melhores formas e condições de ensinar e aprender.

De acordo com Costa e Souza (2017), as instituições de ensino procuram se adequar e se capacitar ao impacto que as Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) demandam sobre a sociedade atual, pois viraram suportes pedagógicos importantes no meio educacional. Porém, precisa-se de uma organização e planejamento de como deve ser usados esses recursos digitais para que não se perca tempo e fundos financeiros. Sendo assim, os profissionais da educação precisam estar capacitados para que possam ensinar seus alunos com novas metodologias de ensino.

---

<sup>1</sup> Graduando do Curso Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, joserodrigues.1610ds@gmail.com;

<sup>2</sup> Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Química da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, rafaelteles090@gmail.com;

<sup>3</sup> Graduado em Licenciatura em Física pela Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, nleonardo15@gmail.com;

<sup>4</sup> Doutora do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, ivoneeteb@gmail.com.

A maioria dos estudantes estão inseridos em um mundo conectado, em que estão sempre em uma constante interação com o mundo digital e tecnológico por meio de mídias sociais, plataformas digitais, simuladores e softwares. Os docentes, podem usar essas ferramentas como os softwares em suas aulas de física e matemática na questão de interpretação gráfica e de fenômenos físicos, por exemplo. Dessa forma, tendo um suporte para ajudar seus alunos na aprendizagem, no desenvolvimento de habilidades cognitivas, investigativas e de raciocínio lógico, despertará nos mesmos o senso crítico que existe em de cada um.

De acordo com Santos (2018), a simulação é bastante utilizada por engenheiros e cientistas para estimar o comportamento de um produto e seus fenômenos físicos, podendo avaliar o melhor modelo, a seguir mais rapidamente, produzindo resultados válidos com características reais da operação de secagem. Desse modo, a modelagem matemática e a definição da forma do corpo são fundamentais para que se tenha um realismo do processo de secagem. Conforme Araújo (2018), a utilização de tecnologias no processo de secagem são importantes, pois visam diminuir os gastos operacionais, energéticos e o tempo necessário para atingir a umidade almejada no material, tendo um controle de qualidade do material que constitui o corpo.

Neste contexto, nosso trabalho tem como objetivo, apresentar uma solução analítica através de simulações computacionais em diferentes softwares a partir da modelagem matemática que prevê o transporte de umidade em uma placa plana cerâmica, com base na teoria da difusão líquida e considerando o método GBI (método integral baseado em Galerkin), e a condição de contorno 1ª espécie e propriedades termo-físicas constantes, comparamos os resultados obtidos na simulação com os dados reportados na literatura de (SANTANA, 2006), que secou uma placa cerâmica com as dimensões de (120 x 60) cm, temperatura 110°C, umidade relativa do ar de 2,00% e com os seguintes teores de umidade: inicial  $\phi_0 = 0,099$  e de equilíbrio  $\phi_e = 0,003515$ . Os resultados da cinética de secagem e do teor de umidade obtidos através das simulações, foram apresentados, discutidos e analisados.

## **METODOLOGIA**

A transferência de massa, ocorre por fluxo de umidade devido a gradientes de concentração existentes no corpo, fundamentada na teoria da difusão líquida, segunda lei de Fick, é utilizada para demonstrar a transferência de massa em modelos matemáticos, (BROOKER et al., 1992; Incropera e De Witt, 1990), a seguir:

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

onde  $M$  é o teor de umidade do sólido que varia em função do tempo e  $D$  o coeficiente de difusão.

A solução da Equação (1) de acordo com (PAYNE et al., 1986), é dada por:

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

na qual, os termos presentes nesta solução são denominados como:  $C_n$  é a  $n$ -ésima constante a ser determinada,  $\psi_n$  é a  $n$ -ésima autofunção,  $\gamma_n$  é o  $n$ -ésimo autovalor e  $M_e$  é o teor de umidade de equilíbrio.

Para a formulação da modelagem matemática no processo de secagem envolvendo a transferência de massa na placa cerâmica, foram determinadas algumas restrições, são elas:

- (a) o sólido é homogêneo e isotrópico;
- (b) a distribuição de umidade e a temperatura no interior do mesmo é uniforme no início do processo;
- (c) as propriedades termo-físicas são constantes durante todo o processo;
- (d) o sólido é constituído de matéria seca e água na fase líquida;
- (e) a operação de secagem ocorre pela difusão da umidade e difusão do calor no interior da placa, bem como da evaporação da umidade no exterior da mesma.

Assim, considerando  $C_n$ ,  $\gamma_n$ ,  $M_e$  e  $D$  constantes e  $\psi_n$  uma função independente do tempo, resultante da combinação linear de um conjunto de funções de base, definida pela seguinte equação:

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

onde  $f_j$  é um conjunto de funções de base, conhecido por ser a função de Galerkin, e  $d_{nj}$  são as constantes a serem determinadas. Desta forma, após alguns cálculos e manipulações matemáticas utilizando o método integral baseado em Galerkin que resulta na construção de um sistema simétrico e no método de Cholesky transformando as equações resultantes para a forma matricial, como é descrita a seguir:

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

em que  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  são matrizes quadradas de  $N \times N$  elementos cujos os valores podem ser calculados a partir de:

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

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

Por meio do cálculo das matrizes  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  são obtidos os valores de  $\gamma_n$  e  $\bar{d}_n$ .

Dessa forma, para introduzir as condições de contorno na modelagem se utiliza da Equação (6), em que  $D$  é uma constante. Desse modo, para condição de 1ª espécie (Condição de Equilíbrio) o termo  $f_{ij}$  é igual a 0, tornando a 1ª termo do 2º membro nulo, enquanto que 2º termo é sempre simétrico, como está descrito:

$$\int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV = \int_S D f_i \left( \frac{\partial f_j}{\partial \bar{n}} \right) dS - \int_V D \nabla f_i \nabla f_j dV \quad (6)$$

Em relação a Equação (2) os coeficientes  $C_n$  podem ser determinados aplicando a condição inicial em  $t = 0$  e  $M = M_0$ , obtém-se:

$$M_0 = \sum C_n \psi_n + M_e \quad (7)$$

Utilizando novamente o método de Galerkin que consiste em multiplicar a equação por  $f_i dV$  e a integrar sobre o volume  $V$  na equação (6) é possível encontrar uma função que resulta em um conjunto de  $N$  equações algébricas lineares, possibilitando assim encontrar o valor do  $C_n$ , solucionando o problema (KANTOROVICH; KRYLOV, 1960), obtendo-se:

$$\int_V f_i (M_0 - M_e) dV = \int_V f_i \sum C_n \psi_n dV \quad (8)$$

assim, o valor médio do teor de umidade no interior do corpo será obtido por:

$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_V M dV \quad (9)$$

onde  $V$  é o volume da placa cerâmica.

A aplicação da metodologia do processo de secagem na placa plana cerâmica é fundamentada pela função de base que já foi demonstrada por (SANTOS, 2013), descrita na Equação (10):

$$f_j^{(1)} = (a^2 - x^2) \cdot (b^2 - y^2) \cdot x^{(i-1)} \cdot y^j \quad (10)$$

A simulação de secagem foi realizada por intermédio de um código computacional desenvolvido para o processo de secagem da placa plana cerâmica evidenciando-se a transferência de massa, utilizando a plataforma Mathematica®, versão 7.0 (WOLFRAM, 2009).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Concluimos, através das curvas de secagem que o comportamento do processo de secagem é semelhante, aos dados experimentais da simulação, pois tais curvas de secagem ficaram sobrepostas. Ficando evidente que com o passar do tempo o teor de umidade adimensional vai diminuindo e depois dos 4000 s ele vai se estabilizando. O fluxo de umidade nesta operação ocorre do interior para a superfície do corpo. As áreas com maior perda de água possuem os maiores gradientes, pois a diferença de umidade com ar de secagem é maior nas extremidades (bordas) do que no centro da placa. Por isso, a relevância de uma secagem controlada para não ter riscos de perda de produtos. Corroborando para validar os resultados obtidos neste trabalho com os dados experimentais. A produção das curvas de níveis e da cinética de secagem foram geradas através das plataformas Grapher e Surfer, que permitiu a análise do processo ao longo do período.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Percebe-se ao término deste trabalho, que as ferramentas digitais como softwares computacionais são fundamentais como suporte no desenvolvimento educacional dos alunos e também para auxiliar os docentes na criação de suas aulas, além de estarem contribuindo para atenuar os problemas que a pandemia do coronavírus nos trouxe.

Constatamos que as simulações computacionais do processo de difusão e o método integral baseado em Galerkin, juntamente com as condições de contorno 1ª espécie foram efetivos para descrever a transferência de massa em uma placa plana cerâmica.

Vemos que os gradientes de umidade ocorrem do centro para o exterior do sólido, e que é preciso um controle rigoroso da operação de secagem. Assim, podemos prever os resultados da transferência de massa, delimitando a melhor maneira de se operar o processo, preservando a qualidade do final do produto.

## **REFERÊNCIAS**

ARAÚJO, M. V. **Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos industriais.** 2019. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

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

COSTA, Maira Capucho; SOUZA, Maria Aparecida Silva. **O USO DAS TICs NO PROCESSO ENSINO E APRENDIZAGEM NA ESCOLA ALTERNATIVA “LAGO DOS CISNES”.** Revista Valore, Volta Redonda, 2 (2): 220-235, Ago./Dez. 2017.

GARCIA, F.W., **A importância do uso das tecnologias no processo de ensino-aprendizagem.** Revista Educação a Distância, Batatais, v. 3, n. 1, p. 25-48, jan./dez. 2013.

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.

KANTOROVICH, L. V. e KRYLOV, V. I., **Approximate methods of higher analysis.**

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 via 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.

SANTOS, J.P.S., **Secagem de materiais cerâmicos com Forma Complexa: Um Estudo Teórico Via CFX.** Tese (Doutorado em engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 103 p., 2018.

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