



FLUXO DE MASSA EM SÓLIDOS CERÂMICOS VIA MÉTODO INTEGRAL BASEADO EM GALERKIN

Joseane Freire Pereira¹
Rafael Teles Cruz Silva²
Nórton Leonardo Teodório Rafael³
Ivoneete Batista dos Santos⁴

RESUMO

O material cerâmico está há bastante tempo presente na vida dos seres humanos, dele pode ser feito vasos, jarros, tijolos, etc. No Brasil, a sua origem foi no estado do Pará, na ilha de Marajó, onde os índios da região tinha melhores técnicas de fabricação da cerâmica em comparação com outros povos. Atualmente, as regiões sudeste e sul se tornaram as maiores produtoras do material cerâmico em comparação com outras regiões, mas podemos considerar o crescimento do nordeste devido à demanda da construção civil. A argila tem uma estrutura de sólido amorfo que sobrepõe a de um sólido cristalino, as fases de sua produção são: extração da jazida, preparação, conformação, secagem e queima. A secagem envolve simultaneamente o fluxo de calor e massa em um sólido cerâmico, cuja principal característica é retirar umidade do produto, mas para bem modelar o processo é necessário desenvolver um modelo matemático que considere a geometria do sólido. Este trabalho, tem por objetivo aplicar o método GBI como modelo matemático, empregando a teoria da difusão líquida e, considerando as propriedades termo-físicas constantes e a condição de contorno de 1ª espécie e realizar a simulação computacional para descrever o processo de secagem no sólido cerâmico através de softwares. Os resultados gráficos para a cinética de secagem e para a distribuição do teor de umidade serão apresentados e discutidos.

Palavras-chave: Fluxo de massa, Sólido cerâmico, Simulação, Método GBI.

INTRODUÇÃO

A cerâmica está há bastante tempo inclusa na história do homem, foi um dos primeiros materiais que o mesmo utilizou para fazer objetos, ocorrendo em várias civilizações como: mesopotâmicos, egípcios, gregos e entre outros, o que era de simples produtos feitos a partir dela, como jarro e vasos, hoje se tornaram exuberantes construções constituídas do material, como os tijolos com que são feitos os arranha-céus (ZACCARON, 2018).

¹Mestranda do Curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, joseaneuepb@gmail.com;

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

³Graduando pelo Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, nleonardo15@gmail.com;

⁴Doutora do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, ivoneetebs@gmail.com;



No Brasil, os índios usavam a matéria prima para fazer objetos, para transportar alimentos e líquidos, tais objetos não eram tão bem feitos como os que vemos hoje, isso decorre das etapas de fabricação da cerâmica, a exemplo, da etapa de queima do sólido, eles eram, nesse período, queimados no chão com lenha (SILVA, 2018).

De acordo com Santos (2019), a cerâmica no país possui sua gênese na ilha de Marajó, no estado do Pará, onde os índios marajoaras tinham uma técnica mais elaborada para fazer o produto, sendo usada a raspagem, a incisão, a excisão e a pintura. Ao contrário do que muitos pensam sobre a cultura da cerâmica no Brasil, ela não chegou com os portugueses nem com os africanos, eles apenas ajudaram a evoluir o processo de fabricação do produto que já tinham nesta terra.

Atualmente, o país se tornou um dos maiores produtores e consumidores de cerâmica do mundo, a maior concentração dessa produção está no sul e sudeste do mesmo, onde existem inúmeras indústrias que trabalham com o material, destacamos essas duas regiões devido aos recursos naturais do material argiloso, centros de pesquisas, energia entre outros fatores que as favorecem, mas também podemos destacar o crescimento da região nordeste no setor, que tem se ampliado por motivo da procura do produto visando a construção civil, gerando a implementação de novas fábricas (SANTOS, 2019).

Segundo Araújo (2019), a argila é formada em sua grande parte de material não-cristalino, que se sobrepõe a quantidade de material cristalino. Ela é constituída de silicatos, minerais do grupo caulinita, minerais do grupo montmorilonita, minerais micáceos e minerais de alumínio hidratados. Ela ainda pode ser classificada como: argila natural, argila refratária, caulim ou argila da china, argilas de bola, argilas para grés, argilas vermelhas, bentonita e argilas expandidas.

A argila natural é um tipo de material que não vai precisar adicionar outras substâncias, vai ser usada como produto após ser limpa. A argila refratária, usada em cerâmicas que revestem fornos, possui aplicações em materiais de isolamento térmico. O caulim ou, como também é conhecida, a argila da china, tem uma pigmentação branca, usada na produção de massa para porcelana, ela é bastante resistente as altas temperaturas. As argilas de bola têm uma coloração azul ou negra e durante as fases de produção do material cerâmico como a secagem e a queima contraem-se muito. A argila para grés é composta de grãos finos, incluindo o feldspato em sua composição. A bentonita é uma argila de origem vulcânica, que pode aumentar muito o seu volume ao entrar em contato com água. Para a argila expandida, temos



características envolvidas como o bom isolamento térmico, acústico e resistência mecânica (ARAÚJO, 2019).

A argila vermelha é a matéria-prima de interesse nesta pesquisa, como também o seu produto, a cerâmica vermelha ou cerâmica estrutural, cuja composição está presente o ferro. Quando queimada possui a coloração mais escura devido à substância que está em grande quantidade em sua formação, além disso, são resistentes as temperaturas elevadas (ARAÚJO, 2019).

De acordo com Zaccaron (2018), a cerâmica vermelha possui várias etapas durante a sua produção, tais como: extração da matéria-prima, preparação da matéria-prima, conformação, secagem e queima.

A secagem compreende um processo termodinâmico, que reduz a umidade contida em um sólido cerâmico através do aumento de temperatura via fornecimento de energia térmica, o sólido vai secar de dentro para fora. Ela vai ocorrer diminuindo a quantidade de umidade excedente, evidenciando que a transferência de massa dá-se na forma líquida ou vapor no material (BRITO, 2016). Além disso, a secagem é um processo simultâneo que envolve a transferência de calor e massa no sólido, e para explicá-lo utilizamos a lei de Fourier e a lei Fick, juntamente com o modelo matemático de suas equações (SILVA et al., 2019).

Portanto, a secagem pode se dividir em três formas: natural, artificial e mista. A secagem natural é realizada de maneira tradicional e geralmente essa forma é vivenciada no campo, ela consiste em expor o produto ao sol durante vários períodos até que a água contida em excesso se evapore, no entanto, é um processo demorado e o produto fica desprotegido a ação de micro-organismos e insetos ou ainda pode levar a perda do próprio produto, pois não se tem um ambiente com as condições necessárias controladas (SILVA, 2016).

Já o processo de secagem artificial é bastante controlado e rápido, praticado nas indústrias, consistindo em utilizar secadores que evaporam a umidade excedente no produto, nesta forma, controlamos o ar de secagem, a velocidade do ar de secagem, a temperatura e a umidade relativa. Finalmente, a secagem mista que consiste em utilizar as duas formas já descritas para secar produtos, são usadas de maneira combinada durante o processo, podendo inclusive ser muito favorável para produtores de pequeno porte (SILVA, 2016).

Como já foi elencado durante o texto, a secagem é a etapa que merece bastante cuidado, pois não sendo realizada de maneira uniforme originará empenamentos, trincas, fissuras, eflorescência e coração negro no produto, devido as tensões correspondentes a esta fase (BRITO, 2016).



Conforme Silva (2016), para explicar a secagem, transferência de calor e massa, podemos utilizar algumas teorias de como o processo funciona em meios porosos, são: a teoria da difusão líquida, a teoria capilar, a teoria da vaporização-condensação, a teoria de Luikov, a teoria de Philip e De Vrie e de Berger e Pei, a teoria de Forte e Okos e a teoria de Krischer. A teoria da difusão líquida considera que a difusão no material cerâmico é consequência do gradiente de concentração, o líquido em estudo é a água em sua fase líquida e a teoria também se estende aos alimentos.

No estudo do processo de secagem é importante empregar um modelo que seja efetivo em descrever a geometria real do objeto que está sendo considerada a secagem, em vista que ela é empregada em diferentes geometrias para mais diversas finalidades nas indústrias e nas pesquisas, no entanto, ainda podemos verificar que alguns modelos não descrevem o processo como realmente é, ocasionando divergências entre o modelo teórico que são propostos e o que é encontrado em resultados experimentais de fato, principalmente, discordâncias entre os dados da cinética de secagem e a distribuição do teor de umidade. Portanto, torna-se essencial considerar a forma do objeto no modelo matemático, que resulta em um modelo com mais confiança, minimizando incoerências nos dados teóricos e experimentais (SANTOS et al., 2010).

De acordo com Santos (2018), a simulação é um modelo que nos permite representar o comportamento de um determinado sistema, são relações matemáticas ou lógicas, comumente utilizada por pesquisadores, para prever a dinâmica do objeto em estudo sobre certas condições. Desse modo, como são modelos, elas só serão creditadas a partir de validação para que realmente se tornem reprodução de um fenômeno real.

Nesta pesquisa, vamos considerar o fluxo de massa no sólido cerâmico, usando simulações através dos softwares: Mathematica, Grapher e Surfer, o primeiro software possibilita a resolução de cálculos diversos, já os outros softwares permitem a publicação rápida de gráficos e imagens de melhor qualidade.

A pesquisa foi desenvolvida com apoio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, na área de Ciências Exatas e da Terra, e subárea de Física Matemática. O programa citado, objetiva estimular a participação de estudantes graduandos na pesquisa, despertar talentos, impulsionar o pensar científico e a criatividade entre outros.

Este trabalho, tem como intuito apresentar uma pesquisa com ênfase na simulação computacional de dados experimentais do processo de secagem, fluxo de massa em sólido



cerâmico. Com esse objetivo, descrevemos o processo difusivo no material por intermédio da teoria da difusão líquida e um modelo matemático com a sua solução analítica via método integral baseado em Galerkin, considerando durante todo o processo condição de contorno de 1ª espécie e propriedades termo-físicas constantes. Os resultados serão exibidos por meio de representação gráfica da cinética de secagem e da distribuição do teor de umidade no sólido cerâmico.

METODOLOGIA

A Equação (1), descreve o processo de fluxo de massa no sólido cerâmico, comumente chamada de 2ª lei de Fick ou equação da difusão de massa, para um regime transiente e sem geração de energia (BROOKER et al., 1992):

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

onde: M é o teor de umidade e D é o coeficiente de difusão no sólido cerâmico.

A Equação (1), possui a seguinte solução (PAYNE et al., 1986):

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

os seguintes termos da solução serão denominados na forma: 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.

Vamos modelar o nosso processo de secagem, considerando o fluxo de massa no sólido cerâmico, iremos adotar para bem descrever esse processo, as seguintes condições:

- (a) o sólido cerâmico é isotrópico e homogêneo;
- (b) inicialmente, durante o processo de secagem a distribuição no interior do sólido cerâmico vai ser uniforme, tanto para umidade quanto temperatura;
- (c) no decorrer do processo as propriedades termo-físicas não são variáveis, vão ser constantes;
- (d) o material cerâmico é formado de água na fase líquida e matéria seca;
- (e) o processo de secagem dá-se pelo fluxo da umidade e condução do calor dentro do sólido, quanto da evaporação da água e convecção de massa no exterior dele.

Vamos substituir a Equação (2) na Equação (1), assim:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\sum C_n \psi_n e^{-\gamma_n t} + M_e] = \nabla \cdot [D \nabla (\sum C_n \psi_n e^{-\gamma_n t} + M_e)] \quad (3)$$

Dessa forma, vamos considerar o C_n , o γ_n , o M_e e o D como constantes e ψ_n não irá depender do tempo, resultando a seguinte equação:

$$\sum [\psi_n \gamma_n + \nabla \cdot (D \nabla \psi_n)] = 0 \quad (4)$$



Ainda, o ψ_n é produto de uma combinação linear de um conjunto de funções, que foram selecionadas e é definida pela Equação (5):

$$\psi_n = \sum d_{nj} f_j \quad (5)$$

os termos d_{nj} , serão constantes que vão ser definidas e, f_j é elemento do conjunto de funções de base, na qual é denominada como função de Galerkin.

Logo, substituindo a Equação (5) na Equação (4):

$$\sum d_{nj} [f_j \gamma_n + \nabla \cdot (D \nabla f_j)] = 0 \quad (6)$$

Vamos fazer uso do método de Galerkin na Equação (6), que vai multiplicá-la por $f_i dV$ e integrar sob o volume do sólido (KANTOROVICH; KRYLOV, 1960):

$$\sum d_{nj} \left[\frac{1}{V} \int_V f_i f_j \gamma_n dV + \frac{1}{V} \int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV \right] = 0 \quad (7)$$

Iremos compactar a Equação (7), em forma de matriz com o método de Cholesky, resultando a Equação (8):

$$(\bar{A} + \gamma_n \bar{B}) \bar{d}_n = 0 \quad (8)$$

Temos que, \bar{A} e \bar{B} são matrizes quadradas de $N \times N$ elementos, irão ser calculadas a partir das equações:

$$a_{ij} = \frac{1}{V} \int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV \quad (9.a)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{V} \int_V f_i f_j dV \quad (9.b)$$

Por meio de \bar{A} e \bar{B} resolvidos, vamos adquirir os valores de γ_n e \bar{d}_n .

Deste modo, aplicaremos a condição de contorno para o nosso estudo, usando a identidade da Equação (11):

$$\int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV = \int_S D f_i \nabla f_j \vec{n} \cdot dS - \int_V D \nabla f_i \nabla f_j dV \quad (10)$$

Considerando D constante, coeficiente de difusão de massa, e reescrevendo a Equação (10), obtemos:

$$\int_V f_i \nabla \cdot (D \nabla f_j) dV = \int_S D f_i \left(\frac{\partial f_j}{\partial \vec{n}} \right) dS - \int_V D \nabla f_i \nabla f_j dV \quad (11)$$

Iremos adquirir os coeficientes C_n da solução para difusão de massa, Equação (2), considerando $t = 0$ onde $M = M_0$. Evidenciando que, para a condição de 1ª espécie, teor de umidade prescrito, possuímos $f_j = 0$.

$$M_0 = \sum C_n \psi_n + M_e \quad (12)$$



Dessa maneira, novamente vamos utilizar o método de Galerkin (KANTOROVICH; KRYLOV, 1960), resultando na Equação (13):

$$\int_V f_i(M_0 - M_e)dV = \int_V f_i \sum C_n \psi_n dV \quad (13)$$

A solução, para essa equação, será um conjunto de N equações algébricas lineares, de primeira ordem, que auxiliaram a encontrar os termos de C_n , para a resolução e solução do nosso problema.

Finalmente, obteremos o valor médio da concentração de umidade no interior do sólido cerâmico com a seguinte:

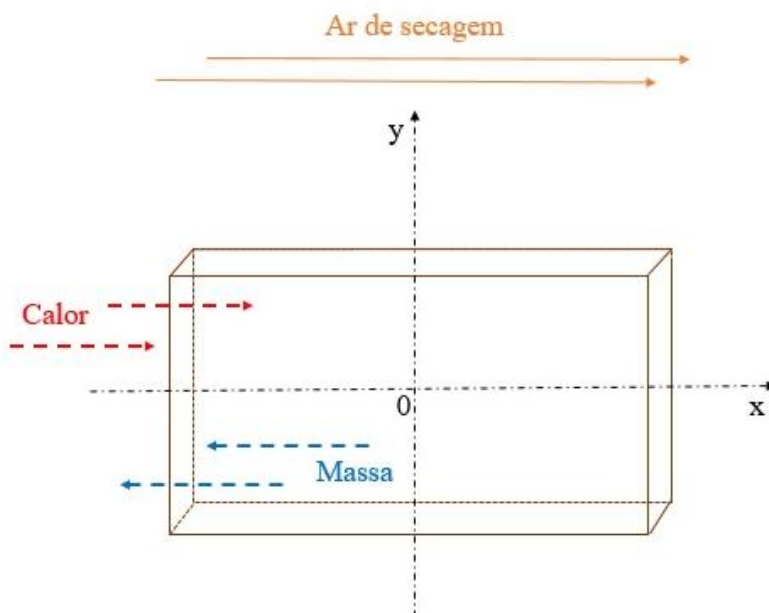
$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_V M dV \quad (14)$$

A Equação (14), será uma solução analítica para a secagem, fluxo de massa, em sólidos porosos, como o sólido cerâmico plano que será o alvo da nossa pesquisa. O símbolo V , é o volume do sólido estudado.

APLICAÇÃO

Esta metodologia será aplicada ao sólido cerâmico plano, como representado na Figura (1):

Figura (1): Representação do processo de secagem no sólido cerâmico.



Fonte: Autoria própria.

O sólido cerâmico é caracterizado pela função de base seguinte:



$$f_j^{(1)} = f_{xi} \cdot f_{yj} \quad (15)$$

ou ainda,

$$f_j^{(1)} = (-2a^2 - a^3B_2 + aB_2x^2) \cdot (-2b^2 - b^3B_4 + bB_4y^2) \quad (16)$$

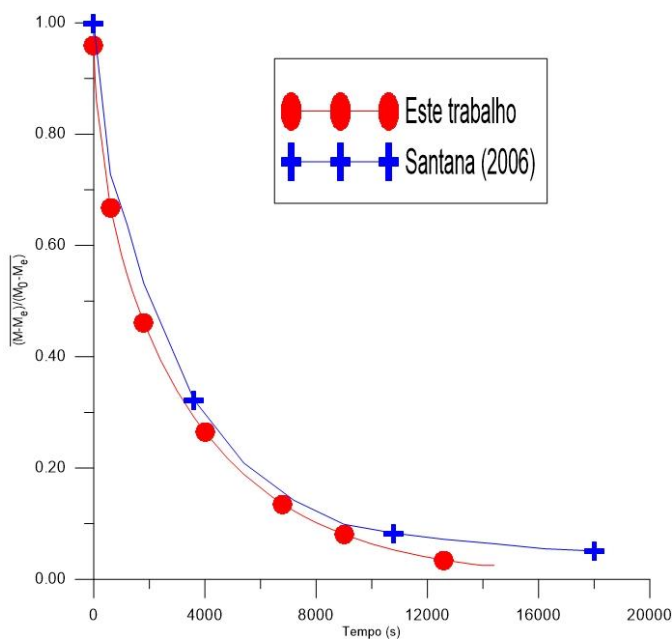
Como se trata de uma pesquisa com característica simulacional, utilizamos para fazer a simulação da secagem, especificamente o fluxo de massa, um código computacional que foi desenvolvido para bem descrever este processo, o qual foi operado através da plataforma Mathematica®, versão 7.0 (WOLFRAM, 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sólido cerâmico estudado tem dimensões 12,0 cm x 6,0 cm x 0,70 cm, com concentração de umidade inicial 0,097, temperatura de 110°C, utilizando o método integral baseado em Galerkin e condição de contorno para 1ª espécie, esta pesquisa a nível experimental foi obtida por Santana (2006).

Através da Figura (2), comprova-se a validação dos nossos resultados com do pesquisador, esse gráfico foi obtido por meio do software Grapher™, versão 8, podemos observar os resultados da cinética de secagem a seguir:

Figura (2): Cinética de secagem para os resultados obtidos através dessa pesquisa e o trabalho do pesquisador (SANTANA, 2006).



Fonte: Autoria própria.



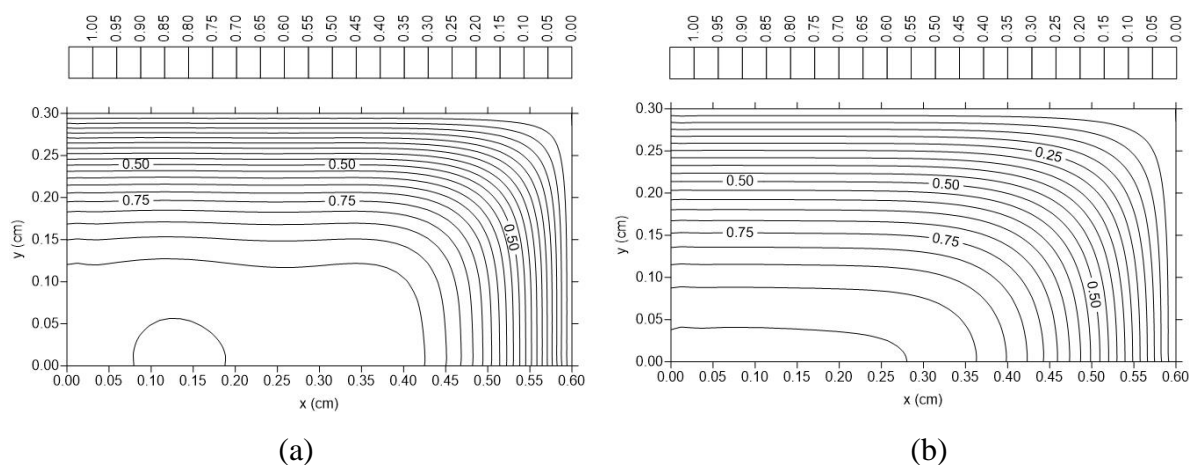
Analisando a curva da cinética de secagem, Figura (2), podemos verificar que as maiores concentrações de umidade (água) estão nos primeiros tempos de secagem, ou seja, obtendo os menores números de Fourier (tempo adimensional). O processo de secagem é mais intenso no início, com o passar do tempo torna-se mais lento, dependendo inclusive da geometria do sólido estudado, dessa maneira um sólido com um furo em círculo no centro seca mais rápido, entretanto, um sólido com uma geometria diferenciada, como um furo em forma de elipse vai demorar mais a secar (SILVA et al., 2010).

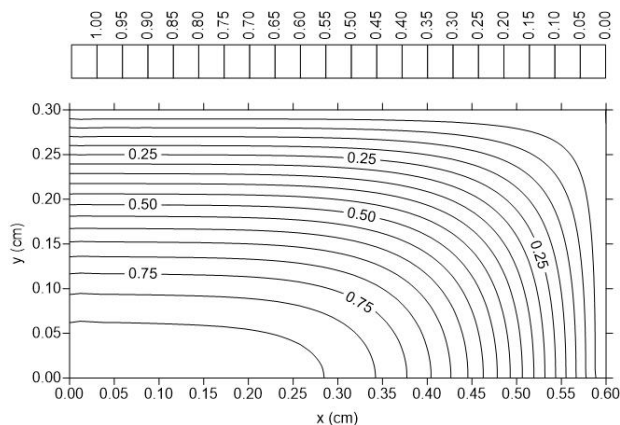
Portanto, no gráfico analisamos fisicamente a taxa com qual a umidade é liberada do material, a variação da umidade em relação ao tempo, interpretando-se na velocidade com a qual o sólido cerâmico seca. Além disso, nos permitindo relacionar os dados simulados com os dados experimentais, é possível verificar que eles tem um comportamento de secagem parecidos, tornando o método de simulação computacional viável para ser utilizado em diferentes contextos (SILVA et al., 2009). “Por meio da simulação, a avaliação do modelo pode ser realizada de maneira mais rápida e eficiente, gerando resultados que possibilitam estimar as características reais do processo” (SANTOS, 2018, p. 25).

Como os nossos resultados são adimensionais, segundo Silva et al. (2010), eles podem ser aplicados em diferentes contextos nas etapas de produção do material cerâmico como: umidificação, resfriamento, aquecimento e outros.

Foram simulados por intermédio do software Surfer®, versão 9, três tempos para secagem, onde é observada a distribuição da umidade dentro do sólido cerâmico na Figura (3).

Figura (3): Simulação de secagem nos tempos de 600 s, 1200 s e 1800 s, distribuição do teor de umidade adimensional dentro do sólido.





(c)

Fonte: Autoria própria.

Ao longo do período de secagem, como podemos observar na Figura (3), que origina-se um gradiente de concentração, no qual vai ser o nosso agente físico, devido a evaporação do líquido na superfície do sólido ser mais volátil ainda existirá uma certa quantidade de líquido dentro do sólido que não conseguiu ser liberada, onde esse líquido irá se movimentar desse lugar para fora por meio dessa diferença de concentração, essa interpretação física dá-se através da teoria da difusão líquida, onde esse modelo considera o coeficiente de difusão de massa constante (SANTOS, 2018).

A etapa da secagem, é a que mais se necessita cuidados, pois, se não for feita com extrema eficácia e de maneira correta, pode ocasionar prejuízos econômicos e tempo para o produtor. Durante a passagem da umidade que acontece de dentro do sólido cerâmico para fora do mesmo, pode ocorrer geração na forma de tensões internas, pois o exterior se contrai ao passo que o interior não está contraído ainda, por causa da umidade existente. Que podem acarretar defeitos como: empenamentos, trincas, fissuras e outros, se o processo não for bem controlado (SILVA et al., 2009).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Obtivemos êxito em utilizar o método integral baseado em Galerkin para solucionar o problema do processo de secagem, compreendendo o fluxo de massa no sólido cerâmico com condição de contorno para 1ª espécie e coeficiente de difusão de massa constante. Portanto, analisando os nossos resultados, podemos listar os seguintes:

- ✓ A secagem é mais intensa no início, onde temos maior concentração de umidade no material correspondendo aos menores números de Fourier.



- ✓ O gradiente de concentração, devido a umidade que fica após a água volátil ser evaporada da superfície se deslocará através do sólido por meio dessa diferença de concentração que pode ser interpretada por meio da teoria da difusão líquida.
- ✓ O processo de secagem precisa ser realizado com cautela, pois o sólido sofre tensões devido ao processo tornando-o suscetível a trincas, empenamentos e outros.
- ✓ A simulação computacional foi eficaz comparando com os dados obtidos pelo trabalho do pesquisador (SANTANA, 2006).

AGRADECIMENTOS

A presente pesquisa foi realizada com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-Brasil, durante o desenvolvimento do projeto de IC da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB. Contou com o apoio da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, na pessoa do Professor Antônio Gilson Barbosa de Lima, do Departamento de Engenharia Mecânica.

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.
- BRITO, M. K. T. **Estudo teórico da transferência de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos com forma paralelepípedica**. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book, 1992.
- 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 Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2006.



SANTOS, I. B.; SILVA, L. P. L.; SILVA, A. A.; LIMA, A. G. B. **Transporte de massa em sólidos com forma arbitrária via método integral baseado em Galerkin usando condição de contorno convectiva.** Mecânica Computacional Vol XXIX, págs. 2865-2881, 2010.

SANTOS, J. P. S. **Secagem de materiais cerâmicos com forma complexa: um estudo teórico via CFX.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2018.

SANTOS, R. S. **Estudo do processo de secagem de blocos cerâmicos estruturais: modelagem e simulação.** 2019. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2019.

SILVA, A. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. **Estudo analítico de secagem de placas cerâmicas usando o método integral baseado em Galerkin e condição de contorno de Dirichlet.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 4.2, p. 48-55, 2009.

SILVA, A. A.; SANTOS, I. B.; LIMA, A. G. B., **Transporte de massa em sólido com forma arbitrária via método GBI: um estudo analítico.** VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010, Campina Grande. CONEM. Campina Grande 2010.

SILVA, A. M. V. **Secagem de blocos cerâmicos industriais: modelagem, simulação e experimentação.** 2018. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2018.

SILVA, R. T. C.; LEITE, I. B.; LIMA, A. G. B.; SANTOS, I. B. **Transporte de calor e massa em sólido quase quadrado.** Anais IV CONAPESC. Campina Grande: Realize Editora, 2019.

SILVA, V. S. **Transferência de Calor e Massa em Materiais com Forma Complexa via Método da Análise Concentrada. Estudo de Caso: Secagem de Materiais Cerâmicos.** 2016. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2016.

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

ZACCARON, A. **Estudo do processo de secagem rápida em argilas utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha.** 2018. 201 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2018.