

## TRANSPORTE DE CALOR E MASSA EM SÓLIDO QUASE QUADRADO

Rafael Teles Cruz Silva <sup>1</sup>  
Ítalo Batista Leite <sup>2</sup>  
Antônio Gilson Barbosa de Lima <sup>3</sup>  
Ivoneete Batista dos Santos <sup>4</sup>

### INTRODUÇÃO

A transferência de calor e massa são fenômenos análogos e simultâneos relacionados à secagem de sólidos, seu objetivo é retirar a umidade contida no interior dos corpos. Para explicar o transporte de calor e massa do interior do corpo faz-se uso das leis de Fourier e Fick, respectivamente.

O principal fenômeno físico da secagem de sólidos é a evaporação, que é feita ao retirar umidade quando se fornece calor aos mesmos. Tal processo ocorre devido aos gradientes de temperatura dentro do corpo em virtude do ar de secagem. A umidade retirada retém-se na superfície do sólido na forma de vapor de água e é arrastada por um meio de transporte, geralmente o ar quente seco proveniente da estufa. A evaporação é controlada, principalmente, pelo tempo e a temperatura, que variam de acordo com o produto desejado.

A secagem é um processo aplicado em alguns setores industriais, como o de alimentos e cerâmicas, e no dia-a-dia das pessoas, podendo ser de forma natural ou artificial. Segundo (SANTIAGO, 2008), a secagem é um dos métodos mais baratos e antigos de conservação de alimentos na indústria, onde a preservação dos mesmos se dá pela diminuição do teor de umidade por desidratação através de um tratamento térmico adequado, não havendo perdas significativas na qualidade nutricional, utilizando o binômio tempo-temperatura adequado.

De acordo com (SANTANA, 2006), esse processo pode causar danos irreparáveis devido aos altos gradientes de umidade e temperatura no interior do corpo, causando perdas na qualidade do produto final. Para contornar esse problema é importante conhecer bem as características do ambiente e ar de secagem, prevendo os efeitos que serão causados na estrutura do produto e suas alterações físico-químicas.

---

<sup>1</sup> Graduando do Curso de Química Ind. da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, rafaelteles090@gmail.com;

<sup>2</sup> Graduando pelo Curso de Eng. Sanitária da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, italocg10@gmail.com;

<sup>3</sup> Doutor em Eng. Mecânica da Universidade Fed. de Camp. Grande - UFCG, antonio.gilson@ufcg.edu.br;

<sup>4</sup> Doutora em Eng. de Processos da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, ivoneetebs@gmail.com; (83) 3322.3222

Dessa forma, é necessário um modelo matemático no qual é possível inserir a maior quantidade de constantes físicas para prever os resultados da secagem do corpo, evitando perdas de materiais, produtos de baixa qualidade ou com deformações, como trincas e empenamentos. De acordo com (OLIVEIRA, 2006), ao inserir todos os efeitos e detalhes conhecidos, dentro das condições estabelecidas, é possível prever com realismo o processo de secagem e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos, assim, obtém-se mais segurança ao realizar a desidratação de um sólido.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a solução analítica de um modelo matemático, via método integral baseado em Galerkin, que mostre a transferência de calor e massa de forma eficiente para sólidos de revolução quase quadrado, a partir de simulações realizadas por softwares computacionais, considerando condição de contorno de 1ª espécie.

## **METODOLOGIA**

Com base na teoria de difusão líquida a segunda lei de Fick tem sido utilizada como modelo matemático na descrição da transferência de massa (Brooker et al., 1992) e, a lei de Fourier para demonstrar a difusão de calor no regime transiente, sem geração de energia (Keey, 1972; Incropera e De Witt, 1992), que descrevem a transferência de massa e calor num meio respectivamente. No entanto, para o estudo da secagem do sólido quase quadrado, faz-se necessário estabelecer as seguintes condições:

- a) o sólido é homogêneo e isotrópico;
- b) à princípio, a distribuição da umidade no interior do sólido é uniforme na medida em que a temperatura aumenta;
- c) as propriedades termo físicas permanecem inalteradas durante a secagem;
- d) água na fase líquida e matéria seca constituem o sólido;
- e) a secagem ocorre com a retirada de água do interior do sólido por difusão e evaporação de água na superfície do mesmo.

Desse modo, as soluções dessas equações, que descrevem a transferência de massa e calor em função de um gradiente de umidade e temperatura respectivamente, são dadas por (PAYNE et al., 1986), que será um conjunto de funções onde, através do método integral baseado em Galerkin, resulta na construção de um sistema simétrico que apresenta a resolução do problema. Ao transformar as equações resultantes, representadas por um conjunto de funções

de base e constantes em função do volume, para a forma matricial, a qual representa matematicamente a variação de calor e massa em toda a extensão do sólido, permite-se, posteriormente, a compreensão do comportamento da temperatura e teor de umidade num sólido de acordo com o seu volume.

Um código computacional foi criado para simular o processo de secagem do sólido em estudo, seguindo o protocolo proposto pela plataforma Mathematica®, versão 7.0 (WOLFRAM, 2009).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, escolheu-se um sólido com razão de aspecto  $b/a = 2$ , cujo contorno é obtido através da função de base descrita por (SANTOS et al, 2011) que ao considerar  $n = 6$ , obteve-se um sólido quase quadrado. Para a validação dos resultados obtidos neste trabalho, foi feita uma comparação com os dados obtidos por (SANTOS et al, 2014), para um sólido de revolução com  $n = 2$  e mesma razão de aspecto.

O sólido de revolução com  $n = 6$  secou rapidamente, atingindo a temperatura e teor de umidade de equilíbrio depois de 500 s, um pouco depois do prolato, que atingiu o equilíbrio próximo aos 500 s.

Notou-se que o prolato também apresentou uma variação maior de temperatura e umidade, especialmente nas suas extremidades, quando comparado ao sólido estudado neste trabalho, isso se deve ao fato de haver um maior gradiente de temperatura nessas áreas ao entrar em contato com o ar de secagem, o que resulta numa transferência de calor mais rápida que é compensada com a transferência de massa, mas tornando a superfície do prolato cada vez mais inelástica com o passar do tempo, impedindo a contração no interior do corpo devido à perda de umidade, fazendo com que o mesmo se torne mais suscetível à deformações na sua superfície, exigindo um controle maior no seu processo de desidratação.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste trabalho, conclui-se que o método utilizado (GBI) é eficiente para descrever a transferência de calor e massa em sólidos com geometrias variadas, como nos sólidos de revolução. A secagem do sólido com  $n = 2$  ocorreu mais rapidamente, em relação ao esferoide de  $n = 6$ , o que comprova como a forma do corpo influencia na desidratação. O prolato apresentou uma rápida secagem devido às suas extremidades terem uma maior variação de

temperatura e umidade, o que resulta numa difusão mais intensa nessas áreas, havendo uma perda de umidade mais intensa e, rápido aumento da sua temperatura interior.

## **REFERÊNCIAS**

BARBOSA DE LIMA A.G., DELGADO J.M.P.Q., SANTOS I.B., SILVA SANTOS J.P., BARBOSA E.S., JOAQUINA E SILVA C. (2014) **GBI Method: A Powerful Technique to Study Drying of Complex Shape Solids**. In: Delgado J., Barbosa de Lima A. (eds) *Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials. Advanced Structured Materials*, vol 48. Springer, Cham.

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

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.

OLIVEIRA, V. A. B. **Transferência de calor e massa no interior de sólidos com forma esferoidal prolata via termodinâmica dos processos irreversíveis**, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2006. 150 p. Exame de Qualificação (Doutorado).

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, 87 P., 2006.

SANTIAGO, A. M. Apostila do curso de Tecnologia dos Alimentos. Campina Grande: UEPB, 2008.

SANTOS, I. B.; SILVA, L. P. de L.; LIMA, A. G. B., **Diffusion in solids of Revolution via Galerkin-based method**. In: Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 21, 2011, Natal. **Proceedings of COBEM**. Natal, 2011.

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