

Distribuição de Temperatura em uma barragem de concreto com o uso de cálculo por elementos finitos

Temperature Distribution in a Concrete Dam Using Finite Element Calculation

RESUMO

David Silva Marques de Souza
davids.souza@hotmail.com
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA
FEDERAL DO PARANÁ,
Medianeira, Paraná, Brasil

Tásia Hickmann
hickmann@utfpr.edu.br
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA
FEDERAL DO PARANÁ,
Medianeira, Paraná, Brasil

Luis Antonio Sucapuca Aracayo
luis.aracayo@ptf.org.br
FUNDAÇÃO PARQUE
TECNOLÓGICO ITAIPU, Foz do
Iguaçu, Paraná, Brasil

O estudo dos fenômenos térmicos é de extrema importância para fins tecnológicos e industriais, no contexto das hidroelétricas, a análise da distribuição de temperatura é significativamente importante, devido tensões térmicas provenientes do campo de temperatura. Neste trabalho, fora feito a análise térmico transiente de um bloco de concreto, do tipo contraforte, da barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu nos anos 2016 e 2017. Com a finalidade de aplicar o Método dos Elementos Finitos (MEF), os dados dos termômetros superficiais, cuja periodicidade não estava bem definida, foram ajustados por meio de splines cúbicas para uma frequência diária, onde as temperaturas foram utilizadas como condições de contorno do modelo térmico transiente do bloco, e este fora resolvido pelo MEF em linguagem Python, com auxílio da biblioteca Fenics. Obteve-se assim os campos de temperatura para os anos de 2016 e 2017. Os resultados numéricos em um ponto específico e interior da estrutura foram comparados com os dados observados no termômetro interno instalado no bloco por meio do erro MAPE, e este foi em torno de 0,04. A abordagem proposta fora inovadora para a análise térmica por se trata de uma aplicação pouco observada tanto para a linguagem Python quanto para a biblioteca Fenics.

PALAVRAS-CHAVE: Análise numérica. Contraforte. Análise térmica.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



ABSTRACT

The study of thermal phenomena is extremely important for technological and industrial purposes, in the context of hydroelectric plants, the analysis of temperature distribution is significant due to thermal stresses from the temperature field. In this work, the transient thermal analysis of a buttress-type concrete block from the Itaipu Hydroelectric Dam dam in 2016 and 2017 was done. In order to apply the Finite Element Method (FEM), thermometer data whose periodicity was not well defined, were adjusted by cubic splines to a daily frequency, where temperatures were used as boundary conditions of the transient thermal model of the block, and this was solved by the MEF in Python language, with the aid of Fenics library. The temperature fields were obtained for 2016 and 2017. The numerical results at a specific point and inside the structure were compared with the data observed in the internal thermometer installed in the block through the MAPE error, and this was around 4%. The proposed approach was innovative for thermal analysis because it is a little observed application for both Python language and Fenics library.

KEYWORDS: Numerical analysis. Buttresses. Thermal analysis.

INTRODUÇÃO

A temperatura e os seus efeitos físicos na matéria são um assunto amplamente estudado em praticamente todos os setores econômicos, principalmente no tecnológico e industrial. Esta realidade evidencia a necessidade e importância de pesquisas e estudos relacionados a área dos fenômenos de transporte.

No contexto das usinas hidroelétricas, de acordo com Maken, Léger e Roth (2013, p. 1), as barragens estão sujeitas a mudanças na sua temperatura interna em função de alterações da temperatura da fronteira e do calor de hidratação, que é uma fonte de calor gerada de reações químicas do concreto durante a fase de construção da barragem. As cargas térmicas externas a uma superfície são originárias da radiação solar e das variações de temperatura do ar, fundação e reservatório e tais cargas podem causar deformações e alterações volumétricas significativas na estrutura, o que frequentemente faz exceder a resistência à tração levando ao desenvolvimento de fissuras.

Segundo Bergman e Lavine (2017, p. 304), o modelo matemático que define a condução transiente é dado pela equação da condução,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde, α é a difusividade térmica do material ($m^2 \cdot s^{-1}$), dada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (2)$$

tal que as constantes da Eq. (2) são propriedades do material sendo estudado, de modo que k é a condutividade térmica, ρ é a densidade e c é o calor específico.

A solução para a Eq. (1) corresponde ao campo de temperatura do problema físico estudado, a qual pode ser elaborada se forem definidas as condições iniciais e de contorno adequadas. De acordo com Lewis, Nithiarasu e Seetharamu (2004, p. 13), as condições de contorno para a equação do calor podem ser de dois tipos, ou uma combinação destas - condição de Dirichlet, que é a temperatura estabelecida em uma porção do contorno do domínio e/ou condição de Neumann, que é fluxo de calor prescrito em outra porção do contorno do domínio.

Segundo Hickmann (2016, p. 18) a correta análise do campo de temperaturas na barragem é essencial para a determinação das tensões e deformações de provenientes da temperatura. Diante disto, é válido o estudo de métodos capazes de obter o campo de temperatura a partir de dados obtidos por medições em pontos estratégicos da estrutura, tais quais o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

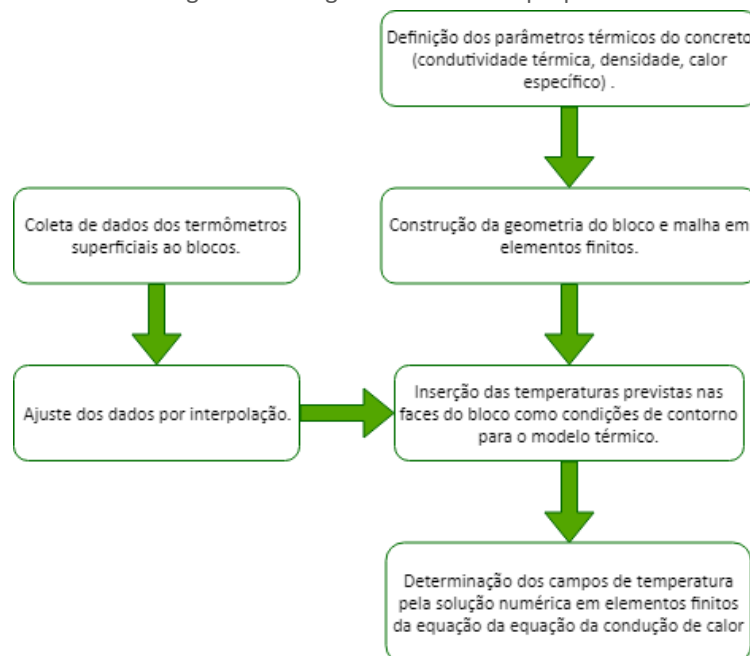
Neste estudo, a aplicação do MEF foi elaborada com o auxílio da biblioteca Fenics, consoante Logg, Mardal e Well (2012, p. V) a mesma foi desenvolvida e implementada com o apoio de Anders Logg, membro do laboratório simula, e pesquisador da universidade de Oslo, com a finalidade de ser uma biblioteca que trabalhe com todas as etapas do processo de implementação dos elementos finitos, desde a confecção da malha à resolução do método em sua modalidade variacional.

O objetivo deste trabalho foi aplicar o MEF, no bloco D38 da Usina Hidrelétrica de Itaipu na fase de operação, com a finalidade de modelar o campo de temperatura do bloco durante o período de 2016 e 2017, o qual é descrito por meio da equação da condução de calor.

MATERIAL E MÉTODOS

O objetivo principal deste trabalho é determinar a evolução do campo de temperatura, ao longo do tempo, em um bloco de concreto de uma barragem. Com esta finalidade, o bloco D-38 da barragem de contrafortes da Usina Hidrelétrica de Itaipu, localizada no Rio Paraná, na fronteira entre o Brasil e o Paraguai, foi utilizado para a aplicação de um método para a determinação do campo de temperatura. O esquema proposto neste artigo está descrito de modo sucinto na Figura 1.

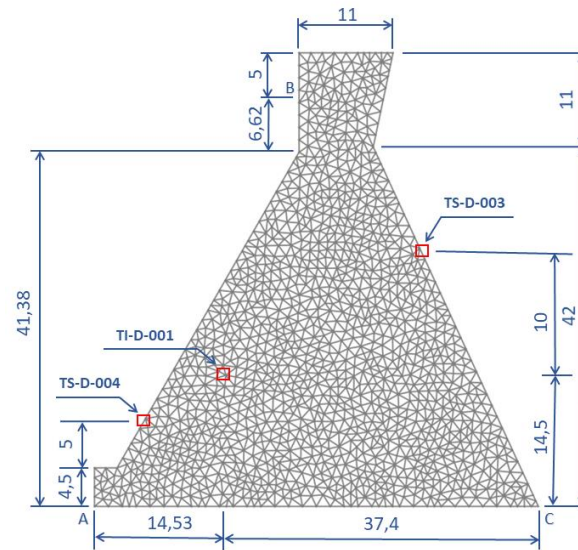
Figura 1. Fluxograma do método proposto



Fonte: Autoria própria (2019).

O esquema proposto por este trabalho consistiu em tomar inicialmente os dados de temperatura dos termômetros TS-D-003 e TS-D-004, localizados na superfície do bloco, e compreendidos entre os anos de 2016 e 2017, com a finalidade de implementar o método na geometria bidimensional simplificada do mesmo, consoante a Figura 2, a qual exhibe a malha adotada, a localização de tais termômetros e suas distribuições nas faces do bloco.

Figura 2. Geometria bidimensional do bloco D-38



Fonte: Autoria própria (2019).

Conforme observa-se na Figura 2, no modelo proposto, fora implementado uma geometria com 1317 nós em uma malha formada inteiramente por elementos triangulares quadráticos, de seis nós. Neste sistema foram adotadas três condições de contorno, definidas pelas medidas dos termômetros superficiais TS-D-003 e TS-D-004, onde a condição A, dada pelo termômetro TS-D-003, abrange toda a montante até a altura do nível máximo de água da usina, a condição B, definida pelo termômetro TS-D-004, contém toda a jusante, crista e a região não submersa da montante, e a condição C, dada como isolada, se estende por praticamente toda fundação do bloco.

Com auxílio de um código em linguagem Python, curvas do tipo splines cúbicas interpolantes foram ajustadas aos dados das séries de cada um dos termômetros para obter dados de temperaturas diários. Embora, a fim de se obter uma condição inicial a ser empregada no ano 2016, considerou-se, também, os dados medidos pelo termômetro TS-D-003 e TS-D-004 no ano de 2015, e um campo de temperatura inicial homogêneo de 20.5 °C, dado pela temperatura média do ambiente.

O campo de temperatura obtido para o dia 31/12/2015 foi empregado como condição inicial para o modelo térmico em elementos finitos e os anos 2016 e 2017 ajustado por spline dos termômetros superficiais como condições de contorno para gerar os campos de temperatura.

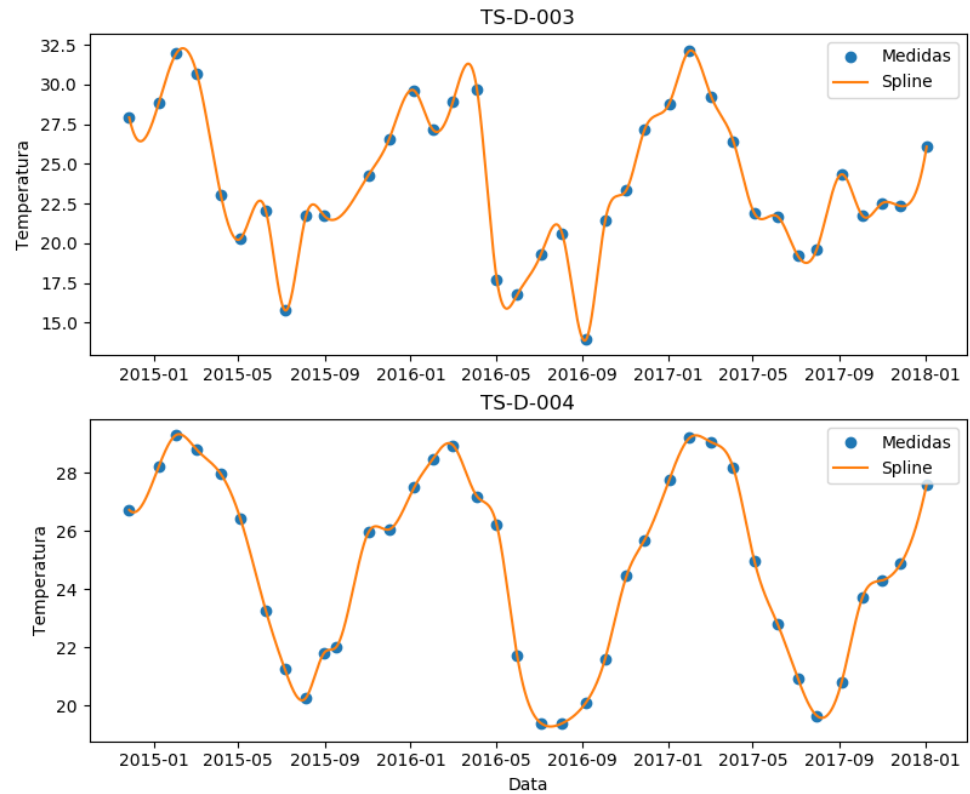
Na resolução do método dos elementos finitos adotou-se um passo no tempo fixo de 864 segundos, onde as condições de contorno, nos instantes com dados faltantes, foram obtidas a partir das curvas do tipo splines cúbicas interpolantes ajustadas aos dados mensais usados como condição de contorno. Na elaboração da simulação em Python, foram utilizadas as constantes de condutividade térmica, densidade, e calor específico do concreto, dadas, respectivamente, por $1,8492 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; $2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e $895,98 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$.

Para validar o modelo térmico obtido foi utilizado dados reais interpolados de um termômetro interno ao bloco, denominado TI-D-001.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os gráficos obtidos com as splines dos dados dos sensores durante os anos de 2015 a 2016.

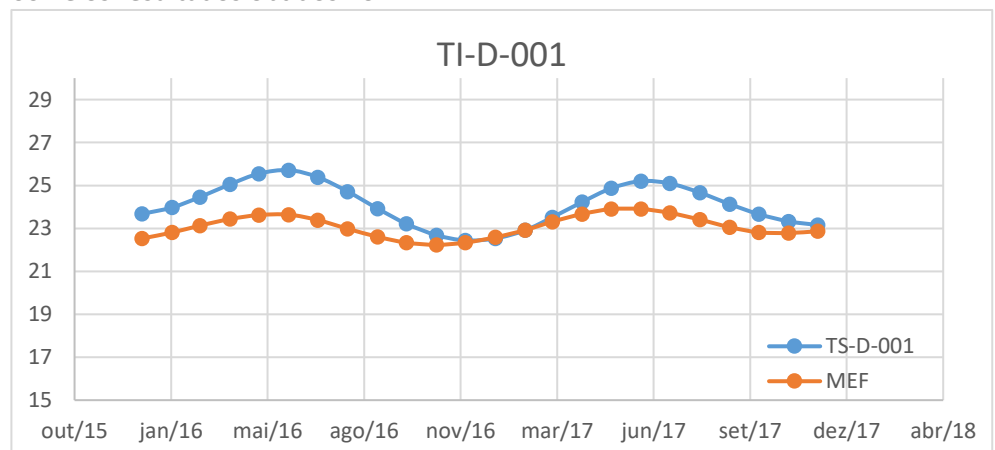
Figura 3 – Gráficos das curvas splines dos dados dos termômetros TS-D-003 e TS-D-004 para o período de 2015 a 2017



Fonte: Autoria própria (2019).

Já a Figura 4 apresenta o gráfico comparativo entre a spline e o MEF para o ano de 2016 e 2017, o qual teve um MAPE de 4,079%.

Figura 4 – Gráficos comparativos entre os dados interpolados do termômetro TI-D-001 e os resultados obtidos no MEF



Fonte: Autoria própria (2019).

Nota-se nos resultados obtidos que as splines elaboradas passam nos pontos medidos, e conseqüentemente, a integridade da simulação é mantida, pois os dados reais permaneceram presentes na simulação, assim como os resultados obtidos com o MEF possuem um erro menor que 10%, com pontos bem próximos dos valores reais.

CONCLUSÃO

Após a evolução dos recursos computacionais, métodos numéricos sofisticados, antes considerados trabalhosos demais para serem utilizados, passaram a ser de ampla utilização para a solução de problemas complexos e de difícil resolução analítica. Esta realidade permitiu o avanço tecnológico e científico, tanto por permitir a compreensão de fenômenos de difícil estudo e compreensão, quanto por baratear a realização de testes de alto custo a partir de sua elaboração em um ambiente computacional e simulado, onde as variáveis podem ser manipuladas conforme a vontade do pesquisador.

No contexto físico, o modelo térmico adotado foi uma simplificação do processo real, fato que promove uma maior margem de erro na análise do fenômeno, pois sabe-se que há mais condições de contorno no sistema em questão, e mais fontes de calor atreladas às superfícies da geometria trabalhada, realidade que justifica as temperaturas obtidas pelo MEF, serem de melhor amplitude que as medidas pelo termômetro. Diante disto, para trabalhos futuros, sugere-se a extensão do problema para a terceira dimensão.

REFERÊNCIAS

MAKEN, D. D.; LÉGER, P.; ROTH, S. N. *Seasonal thermal cracking of concrete dams in northern regions*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. American Society of Civil Engineers, 2013. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000483>. Acesso em: 10 ago. 2019.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8. ed. Nova Jersey: Wiley, 2017.

HICKMANN, T. **ANÁLISE DA VARIAÇÃO TÉRMICA SAZONAL EM BARRAGEM DE CONTRAFORTES COM O USO DE CÁLCULO FRACIONÁRIO**. 2016. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/43384/R%20-%20T%20-%20TASIA%20HICKMANN.pdf?sequence=1>. Acesso em 12 set. 2018.

LOGG, A.; MARDAL, K.; WELLS, G. N. *Automated solution of differential equations by the finite element method*. 1. ed. Oslo. Springer, 2012.