

TEMPERATURE FORECAST IN CONCRETE DAM BY HOLT-WINTERS MODELS AND THE FINITE ELEMENT METHOD

David Silva Marques de Souza¹, Tásia Hickmann¹, Samuel Bellido Rodrigues¹, Jairo Marlon Corrêa¹, Luis Antonio Sucapuca Aracayo²

¹*Federal University Of Technology – Paraná*

Avenida Brasil, 4232, 85884-000, Medianeira – Paraná, Brasil

davids.souza@hotmail.com, hickmann@utfpr.edu.br, samuelb@utfpr.edu.br, jairocorrea@utfpr.edu.br

²*Itaipu Technological Park Foundation*

Av. Tancredo Neves, 6731, 85867-900, Foz do Iguaçu – Paraná, Brasil

luis.aracayo@pti.org.br

Abstract. The article describes a method of forecasting the temperature fields of a concrete block from the Itaipu Hydroelectric Dam located in a region with high thermal gradients, approximately 7 to 40°C. The method involves the application of Holt-Winters exponential smoothing models and a heat conduction model that follows Fourier's Law. Initially, the temperature series, from 2000 to 2016, of two surface-to-block thermometers were adjusted by cubic splines, and, the monthly series, were used as input for Holt-Winters to produce temperature forecasts as outputs for 2017. Monthly (interpolated) and 2017 (predicted) monthly temperatures were used as boundary conditions for the transient thermal block model and it was solved by the Finite Element Method (FEM) in Python language. The predicted temperature fields of the block for 2017 are thus obtained. The numerical results at a specific point and interior of the structure were compared with the observed data of an internal thermometer installed in the block through the MAPE error, and this was around 7%. The proposed method has an innovative approach to the thermal analysis of structures, particularly in concrete dams, regarding thermal field prediction and the first application of the Python language to this problem.

Keywords: Thermal analysis, Buttresses, Numerical methods

1 Introduction

De acordo com [1], as barragens de concreto estão sujeitas à mudanças na sua temperatura interna em função de mudanças de temperatura externa e do calor de hidratação, que é uma fonte de calor proveniente de reações químicas do concreto durante a fase de construção da barragem, mas que se dissipa após certo tempo. As cargas térmicas externas a uma superfície são oriundas da radiação solar e das variações de temperatura do ar, da fundação e do reservatório e tais cargas podem causar deformações e alterações volumétricas significativas na estrutura, o que algumas vezes faz exceder a resistência à tração do concreto levando ao desenvolvimento de fissuras.

A correta avaliação do campo de temperaturas na barragem é essencial para a determinação das tensões e deformações de origem térmica. Sob esse aspecto, é pertinente empregar um método capaz de prever o campo de temperatura, o que propiciaria em outro estudo, também, a previsão de tais deformações na estrutura. Tal abordagem está diretamente ligada a um assunto de grande expressão, que é a segurança de barragens.

O objetivo deste trabalho foi aplicar modelos estatísticos Holt Winters (com auxílio do software R) de previsão das séries temporais dos termômetros presentes em um bloco da barragem de contrafortes da Usina Hidrelétrica de Itaipu na fase de operação e, com o auxílio do Método dos Elementos Finitos, implementado em linguagem *Python*, modelar o campo de temperatura do bloco durante o período de previsão, o qual é descrito por meio da equação da condução de calor.

Trabalhos presentes na literatura abordam metodologias para a descrição do campo de temperatura em

barragens de concreto através do Método dos Elementos Finitos. Como pode ser visto em [2], [3] e [4] e [5].

Diante do cenário que se encontra o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à modelagem térmica de barragens de concreto, percebe-se ainda pouco desenvolvimento no que se refere às análises de previsão do campo de temperatura de barragens em fase de operação. Assim, a partir de dados observados de termômetros instalados no concreto, modelos estatísticos de previsão Holt Winters e o método dos elementos finitos, o comportamento, em um período futuro, dos campos de temperatura em uma barragem pode ser obtido.

Além da análise de previsão térmica em barragem de concreto, o trabalho tem uma importante aplicação do método dos elementos finitos, na sua modalidade variacional, em geometria irregular para a resolução da equação da condução do calor. Esta aplicação foi elaborada por meio da crescente e atual linguagem de programação, que é o *Python*.

A seção 2 apresenta brevemente os conceitos de equação da condução de calor, método dos elementos finitos e modelos Holt Winters.

A seção 3 descreve a proposta metodológica a ser aplicada em um estudo de caso na barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu com a finalidade de prever o campo de temperatura em um bloco de contraforte, por meio da aplicação dos métodos descritos anteriormente.

A seção 4 apresenta os resultados oriundos da metodologia exposta na seção anterior.

A seção 5 apresenta as considerações finais e na sequência tem-se as referências adotadas durante a pesquisa e seu desenvolvimento.

2 Revisão de Literatura

2.1 Modelagem Térmica por Condução

A transferência de calor por condução tem como principal objetivo determinar o campo de temperatura de um meio, resultante das condições impostas nas suas fronteiras. A equação clássica da difusão do calor é determinada pela primeira lei da termodinâmica e pela lei de Fourier que é uma relação empírica que envolve o fluxo de calor e o gradiente de temperatura através de uma constante de proporcionalidade, denominada de condutividade térmica, uma das propriedades dos materiais. De acordo com [6], a equação da condução de calor para um material anisotrópico é escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

onde $k_x(T)$, $k_y(T)$ e $k_z(T)$ são as condutividades térmicas (W/mK) dependentes da temperatura na direção x , y e z , respectivamente, ρ massa específica (kg/m^3), c o calor específico ($J/kg K$) do material e G a taxa de geração de calor interno (energia interna) por unidade de volume (W/m^3).

Para um material isotrópico e onde os coeficientes térmicos k , ρ e c são constantes e não exista geração de calor interno, a Equação (1) pode ser reescrita como:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

onde ∇^2 é o operador Laplaciano e $\alpha = \frac{k}{\rho c}$, chamada de difusividade térmica (m^2/s). ([7])

A solução para a Equação (1) é possível se forem definidas as condições iniciais e de contorno adequadas ao problema físico analisado. De acordo com [7], 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.

2.2 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em uma metodologia para obtenção de solução numérica de equações na forma diferencial ou integral, em particular equações do campo da física-matemática. Estas são

aproximadas sobre regiões simples do domínio (triângulos, quadriláteros, tetraedros e outros) de modo a satisfazer, em conjunto, a continuidade das variáveis de campo (deslocamento, temperatura, pressão) nos pontos nodais dos elementos do domínio. ([8])

As etapas para se alcançar a solução aproximada para um modelo físico através do MEF, de acordo com [7], são:

1. Discretização do contínuo: dividir a região de solução em subdomínios ou elementos não sobrepostos;
2. Seleção das funções base ou de interpolação: tais funções determinam a variação da variável incógnita em estudo;
3. Formulação das equações dos nós: levam-se em consideração as propriedades individuais de cada elemento;
4. Montagem da matriz global para resolução simultânea das equações dos elementos;
5. Aplicação das condições iniciais e de contorno e os carregamentos;
6. Resolução do sistema global para determinação dos resultados nodais, tais deslocamentos e temperaturas em diferentes nós.

Existem várias abordagens para formular problemas em elementos finitos, tais como: Método Direto, Mínima Energia Potencial, Métodos Variacionais e Resíduos Ponderados. Para este trabalho a Equação (1) foi discretizada pelo Método Variacional. Para maiores detalhes consultar [9].

2.3 Métodos de Holt-Winters

A maioria dos métodos de previsão são baseados na observação do passado e quando as variáveis seguem um determinado padrão de comportamento, as técnicas de suavização são muito utilizadas. Sua ampla utilização se dá especialmente pela sua simplicidade, eficiência computacional e razoável precisão [10].

As suavizações vão desde médias móveis simples e suavizações exponenciais simples, as quais não consideram tendência e sazonalidade da série temporal, até métodos mais elaborados como Holt-Winters utilizado para séries temporais que possuem um comportamento mais complexo, apresentando tendência e sazonalidade. Este método se subdivide em três tipos: multiplicativo, aditivo e misto, com ou sem amortecimento, competindo ao pesquisador determinar qual o mais adequado à sua série temporal. Para detalhes dos métodos Holt-Winters consultar [11].

3 Método Proposto

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um esquema que determine a evolução do campo de temperatura previsto em um bloco de uma barragem de concreto para um fixado ano. Para tanto, um bloco 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 previsão do campo de temperatura neste bloco, denominado D-38. O esquema proposto neste artigo está descrito de modo sucinto na Figura 1.

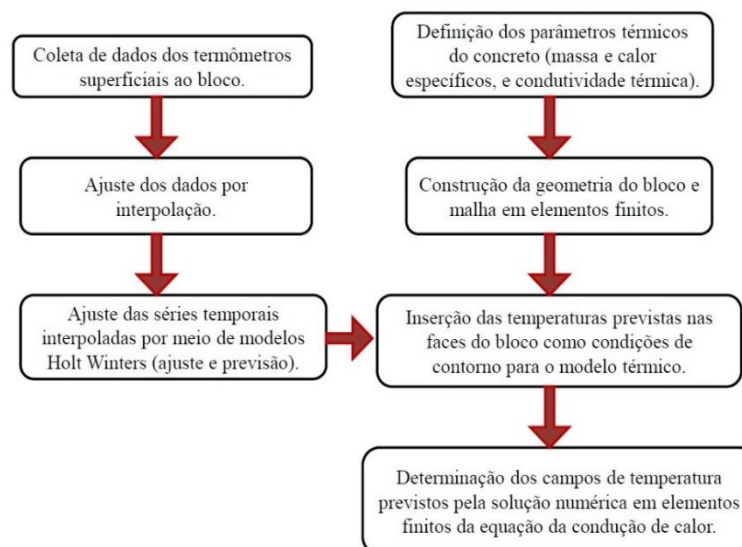


Figura 1. Fluxograma do método proposto.

O esquema proposto consistiu em tomar inicialmente os dados de temperatura, compreendidos entre 2000 e 2017, de 2 termômetros localizados na superfície do bloco, a constar TS-D-003 e TS-D-004. A Figura 2 exhibe a geometria bidimensional do bloco, a localização de tais termômetros e as limitações para as condições de contorno ao bloco.

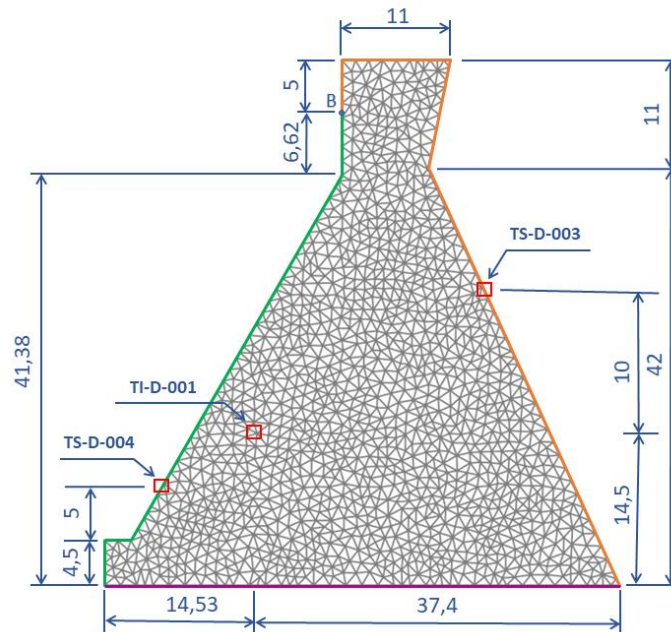


Figura 2. Geometria bidimensional, malha e dimensões (em metros) do bloco D-38

A Figura 2 apresenta uma geometria com 1317 nós e uma malha formada na sua íntegra por elementos triangulares. Neste sistema foram adotadas três condições de contorno, definidas pelas leituras dos termômetros superficiais TS-D-003 e TS-D-004. A condição 1, destacada em verde, foi dada pelo termômetro TS-D-004, abrange toda a montante até a altura do nível máximo de água da usina (ponto B), a condição 2, destacada em laranja, foi definida pelo termômetro TS-D-003, contém toda a jusante, crista e a região não submersa da montante, e, a condição 3, em lilás, dada como isolada, se pela 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 mensais.

Com os dados mensais ajustados pelas splines, modelos estatísticos de Holt Winters foram empregados para modelar as duas séries temporais, com auxílio do *software* R. Os 16 primeiros anos foram utilizados para o treinamento do modelo e o último ano para previsão.

O período dos campos de temperaturas obtidos a partir da solução da equação do calor, compreenderam um ano real, 2016, e um ano previsto, 2017. E para tanto se fez necessário a definição de uma condição inicial, que trata-se do campo de temperatura inicial. Para tanto, considerou-se os dados medidos pelo termômetro TS-D-003 e TS-D-004 no ano de 2015, e um campo de temperatura inicial homogêneo de 18 °C, obtido pela temperatura média do ambiente nos meses mais frios [12].

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

Com a finalidade de resolver o método dos elementos finitos, adotou-se um passo no tempo fixo, de 864 segundos, de modo que as condições de contorno nos momentos com dados faltantes, fora obtida 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 $895,98 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ [12].

Para validar o modelo térmico previsto foi utilizado dados reais interpolados de um termômetro interno ao bloco, denominado TI-D-001, indicado na Figura 2.

Os resultados dos ajustes dos modelos de Holt Winters, campos de temperaturas previstos e o erro aproximado a partir do termômetro interno são exibidos na seção que segue.

4 Resultados Numéricos

Para a série do termômetro TS-D-003 adotou-se o modelo multiplicativo com amortecimento e para a série do termômetro TS-D-004 o modelo aditivo com amortecimento, de acordo com o menor erro MAPE entre os modelos aditivos e multiplicativos com e sem amortecimento.

A Figura 3 apresenta os gráficos comparativos entre as splines e o modelos Holt Winters para o ano de previsão. O MAPE (erro percentual absoluto médio) foi utilizado para estimar o erro entre os modelos, sendo que o MAPE *in* é o MAPE para os primeiros 16 anos (treinamento) e o MAPE *out* para o último ano (previsão) para cada um dos dois termômetros superficiais. No termômetro TS-D-003 obteve-se um MAPE *in* de 10,9932% e o MAPE *out* de 11,7101%, já no termômetro TS-D-004 adquiriu-se o MAPE *in* de 2,6767% e o MAPE *out* de 2,9128%

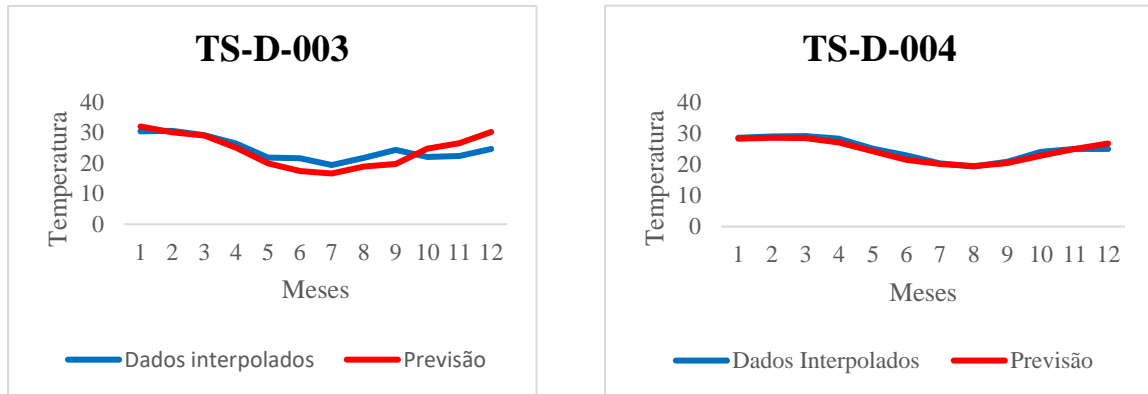


Figura 3 – Gráficos comparativos entre os dados e a previsão dos termômetros TS-D-003 e TS-D-004 para o ano de 2017

A Figura 4 apresenta o gráfico comparativo entre a spline e o MEF para o ano de previsão. O MAPE *in* fora de 10,1713% para o ano de 2016 e o MAPE *out* de 7,1322% para o ano de 2017 (previsão) para o termômetro interno.

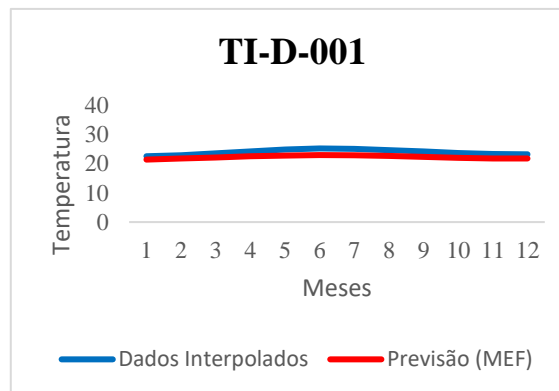


Figura 4 – Gráficos comparativos entre os dados interpolados e a previsão do termômetro TI-D-001 para o ano de 2017

A figura 5 exhibe campos de temperatura do ano de 2017 para os meses de janeiro, março, maio, julho, setembro e novembro e por meio desses campos é possível verificar a distribuição da temperatura no bloco. No início mais acentuada no concreto próximo à superfície e com o passar dos meses a temperatura interna aumenta gradativamente, com temperaturas mais elevadas nos meses próximos ao inverno.

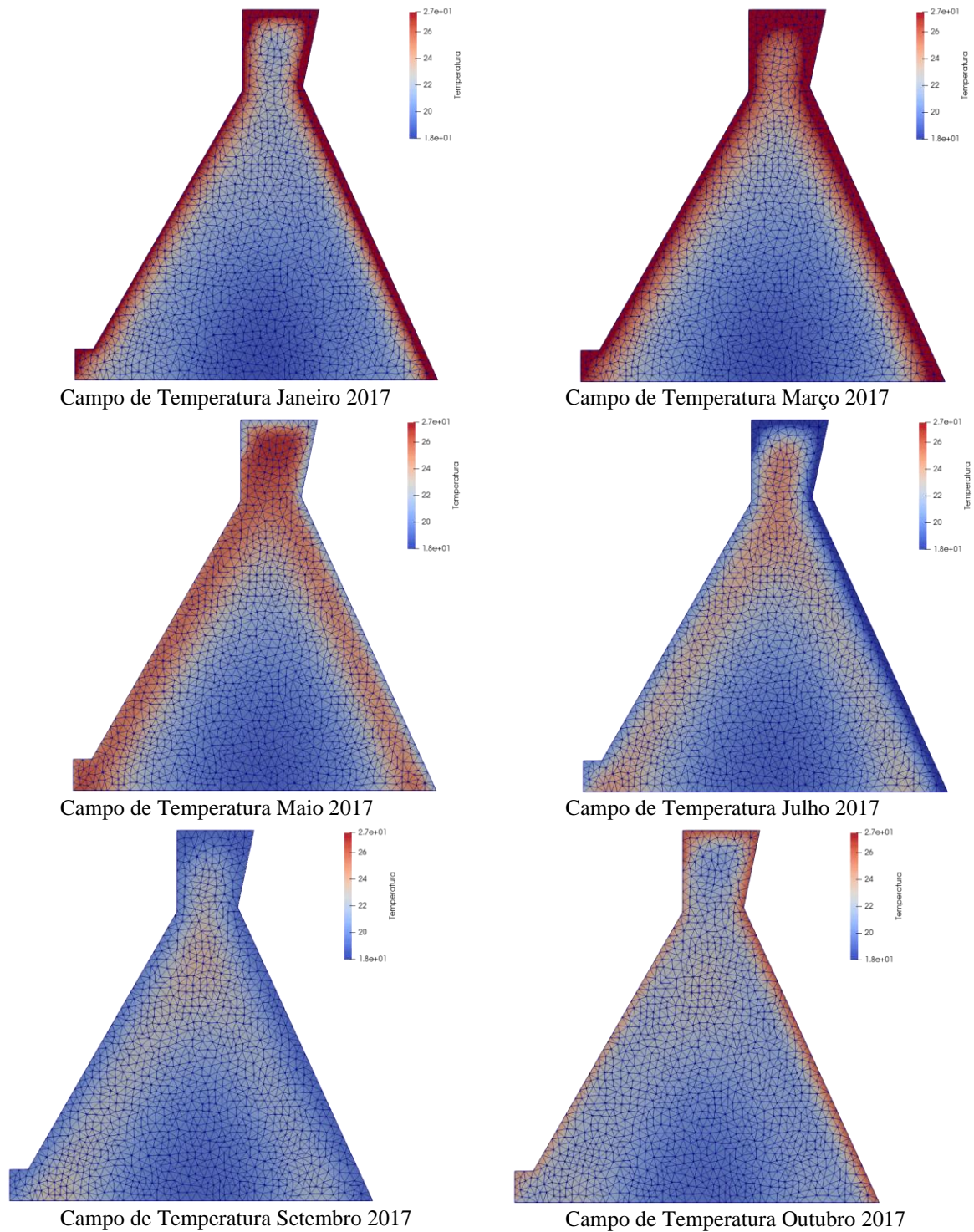


Figura 5 – Campos de Temperatura do ano de previsão 2017

5 Considerações Finais

O objetivo principal deste trabalho era descrever um esquema numérico para obtenção dos campos de temperaturas previstos para um determinado ano com auxílio de modelos estatísticos Holt Winters aplicados às séries de dados de temperaturas de um bloco de concreto de uma barragem e o MEF, implementado em linguagem *Python*, para obter a solução numérica de um modelo de condução de calor de tal bloco. A metodologia empregada ao caso do bloco D-38 da barragem de Itaipu demonstrou-se adequada, uma vez que foi possível validar o modelo

térmico previsto por meio de um termômetro interno, o qual resultou num MAPE em torno de 7%.

O trabalho ainda tem sua grande relevância pois apresenta uma aplicação do MEF, na sua modalidade variacional em linguagem *Python*, ao problema de condução de calor em um bloco de concreto, cuja a geometria é irregular.

Vale ressaltar também que os resultados deste trabalho podem propiciar, em um futuro estudo, o desenvolvimento de uma metodologia de previsão de deformações e deslocamentos do bloco de concreto quando este está sob influência da temperatura. O estudo de tais deformações é de grande importância no quesito segurança de barragens, um tema que tem ganhado grande destaque nos últimos anos.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material que foi incluído aqui como parte deste artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem a permissão dos proprietários para serem incluídos aqui.

Referências

- [1] D.D. Maken, P. Léger and S.N Roth. Seasonal thermal cracking of concrete dams in northern regions. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. American Society of Civil Engineers, 2013.
- [2] M. Daoud, N. Galanis and G. Ballivy. Calculation of the Periodic Temperature Field in a Concrete Dam. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, Nº 5, p. 772-784, 1997.
- [3] H. Mirzabozorg, M.A. Hariri-Ardebili, M. Shirkhan, S.M. Seyed-Kolbadi. Mathematical Modeling and Numerical Analysis of Thermal Distribution in Arch Dams Considering Solar Radiation Effect. *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, Hindawi Publishing Corporation, 2014.
- [4] J. Noorzaei, K.H. Bayagoob, W.A. Thanoon, M.S. Jaafar. Thermal and Stress Analysis of Kinta RCC Dam. *Engineering Structures*, Vol. 28, Nº 13, pp. 1795-1802, Elsevier, 2006.
- [5] T. Hickmann; L.A. Teixeira Junior; A. Faria; S. B. Rodrigues; J. M. Correa; E. Garcia. Temperature field forecast in concrete dam with the use of Arima Models and the Finite Element Method. *Métodos Quantitativos: Pesquisa Operacional*. 1ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2018, v. 3, p. 112-123.
- [6] M.N. Ozisik, "Heat Conduction", John Wiley & Sons, 1993.
- [7] R.W. Lewis, P. Nithiarasu and K. N. Seetharamu. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. John Wiley & Sons, 2004.
- [8] K.K. Gupta, J.L. Meek. A Brief History of the Beginning of the Finite Element Method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 39, p. 3761-3774, 1996.
- [9] H.P. Langtangen, A. Logg. *Solving PDEs in Python – The FEniCS Tutorial*. Volume 1. Springer, 2017.
- [10] P. A. Morettin; C. M. C. Toloi. *Análise de séries temporais*. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.
- [11] R.J. Hyndman, G. Athanasopoulos. *Forecasting: Principles and Practice*. Texts: Online, Open-Access Textbooks, 2018.
- [12] L.A.C. Aracayo. Modelagem térmica de darragem de contraforte via Ansys: Caso de estudo bloco E6 da Usina Hidrelétrica de Itaipu – UHI. TCC, Universidade Federal da Integração Latino-americana, 2016.