

PREVISÃO DE TEMPERATURA EM BARRAGEM DE CONCRETO POR MEIO DE MODELOS HOLT-WINTERS E O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

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

David Silva Marques de Souza

Tásia Hickmann

Samuel Bellido Rodrigues

Jairo Marlon Corrêa

davids.souza@hotmail.com

hickmann@utfpr.edu.br

samuelb@utfpr.edu.br

jairocorrea@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

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

Luis Antonio Sucapuca Aracayo

luis.aracayo@pti.org.br

Fundação Parque Tecnológico Itaipu - FPTI

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

Resumo. O artigo descreve um método de previsão dos campos de temperatura de um bloco de concreto, do tipo contraforte, da barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu localizada numa região com altos gradientes térmicos, 7 a 40 °C aproximadamente. O método envolve a aplicação de modelos de suavização exponencial Holt-Winters e um modelo de condução de calor que segue a Lei de Fourier. Inicialmente as séries de temperaturas no período de 2000 a 2016 de dois termômetros de superfície ao bloco, cuja periodicidade de leitura não está bem definida, foram ajustadas por meio de splines cúbicas e as séries, agora mensais, foram usadas como entrada para modelos Holt-Winters para produzir previsões de temperatura como saídas para o ano de 2017. Temperaturas mensais de 2016 (interpoladas) e 2017 (previstos) foram utilizadas como condições de contorno para o modelo térmico transiente do bloco e este resolvido pelo Método de Elementos Finitos (MEF) em linguagem Python. Obteve-se assim os campos de temperatura previstos do bloco para o ano de 2017. Os resultados numéricos em um ponto específico e interior da estrutura foram comparados com os dados observados de um termômetro interno instalado no bloco por meio do erro MAPE, e este foi em torno de 7%. O método proposto tem uma abordagem inovadora para a análise térmica de estruturas, particularmente em barragens de concreto, no que se refere à previsão de campos térmicos e uma primeira aplicação da linguagem Python a esta problemática.

Palavras-Chave: Análise Térmica, Contraforte, Métodos Numéricos

Abstract. The article describes a method of forecasting the temperature fields of a buttress-type 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, whose read periodicity is not well defined, were adjusted by

cubic splines and the now 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 by means of 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 a first application of the Python language to this problem.

Keywords: Thermal analysis, Buttresses, Numerical methods

1 Introdução

De acordo com [1], as barragens 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, fundação e reservatório e tais cargas podem causar deformações e alterações volumétricas significativas na estrutura, o que frequentemente 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, com dados observados de termômetros instalados no concreto, modelos estatísticos de previsão Holt Winters e o método dos elementos finitos um modelo que caracteriza a evolução do campo de temperatura na barragem num período futuro 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 por meio de uma crescente e atual linguagem de programação, que é Python, para resolver a equação da condução de calor.

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 da 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. As considerações finais são apontadas como conclusão deste trabalho.

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:

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

(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 a mais adequada ao seu estudo. 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.

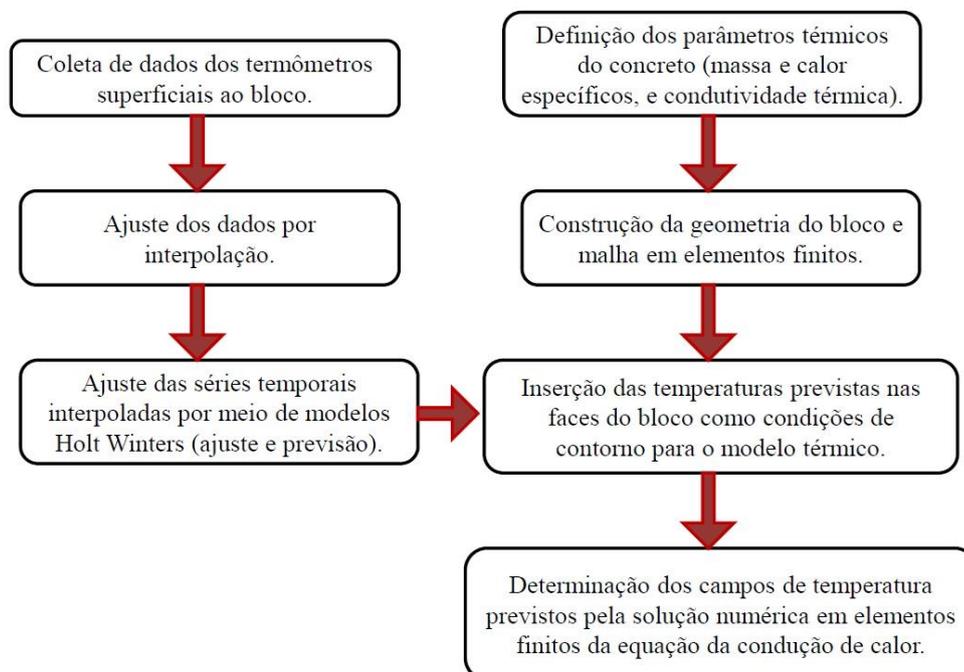


Figura 1. Fluxograma do método proposto

O esquema proposto aplicado ao caso deste trabalho 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 exibe a geometria bidimensional do bloco, a localização de tais termômetros e suas distribuições nas faces do bloco.

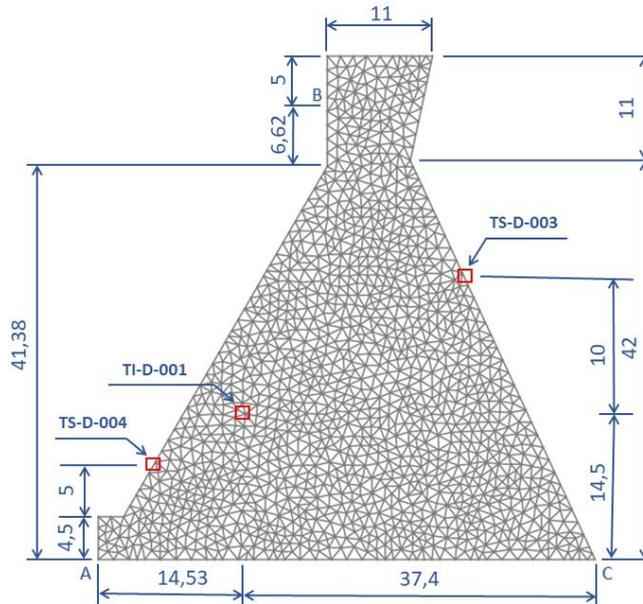


Figura 2. Geometria bidimensional, malha e dimensões (em metros) do bloco D-38

Conforme observa-se na Figura 2, no modelo proposto, fora implementado uma geometria com 1317 nós com uma malha formada inteiramente por elementos triangulares. 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 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.

Afim, 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 18 °C, dado como 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 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 $895,98 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$.

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

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 (Mean Absolute Percentage Error) 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.

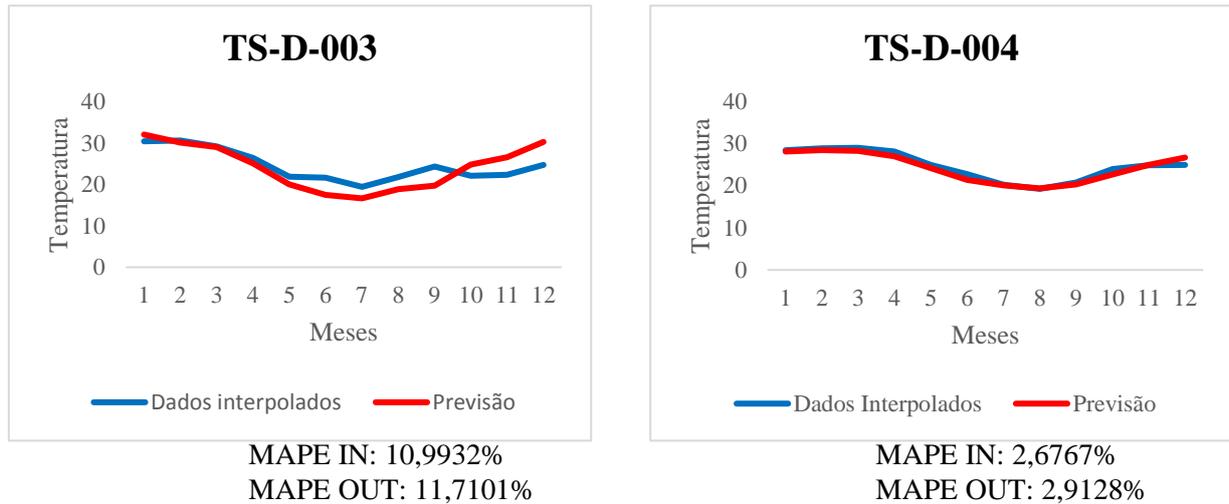


Figura 3 – Gráficos comparativos entre os dados e a previsão dos termômetros TS-D-003 e TS-D-004 para o ano de 2017

Já a Figura 4 apresenta o gráfico comparativo entre a spline e o MEF para o ano de previsão. O MAPE in é o MAPE para o ano de 2016 e o MAPE out para o ano de 2017 (previsão) para o termômetro interno.

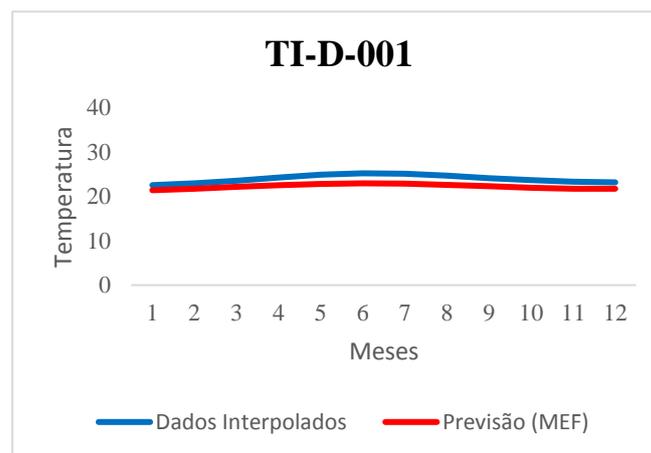
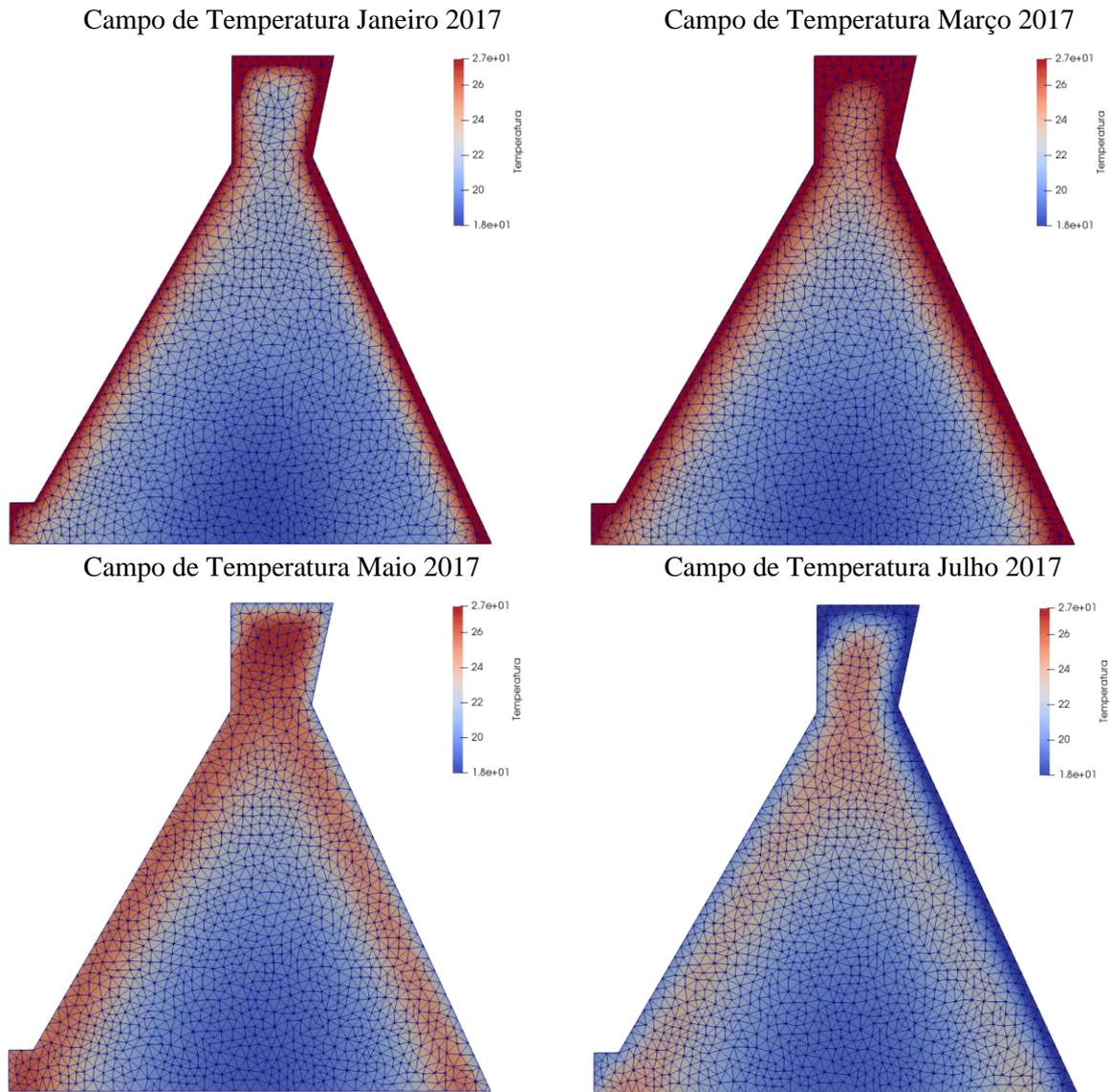


Figura 4 – Gráficos comparativos entre os dados interpolados e a previsão do termômetro TI-D-001 para o ano de 2017

A figura 5 exibe 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.



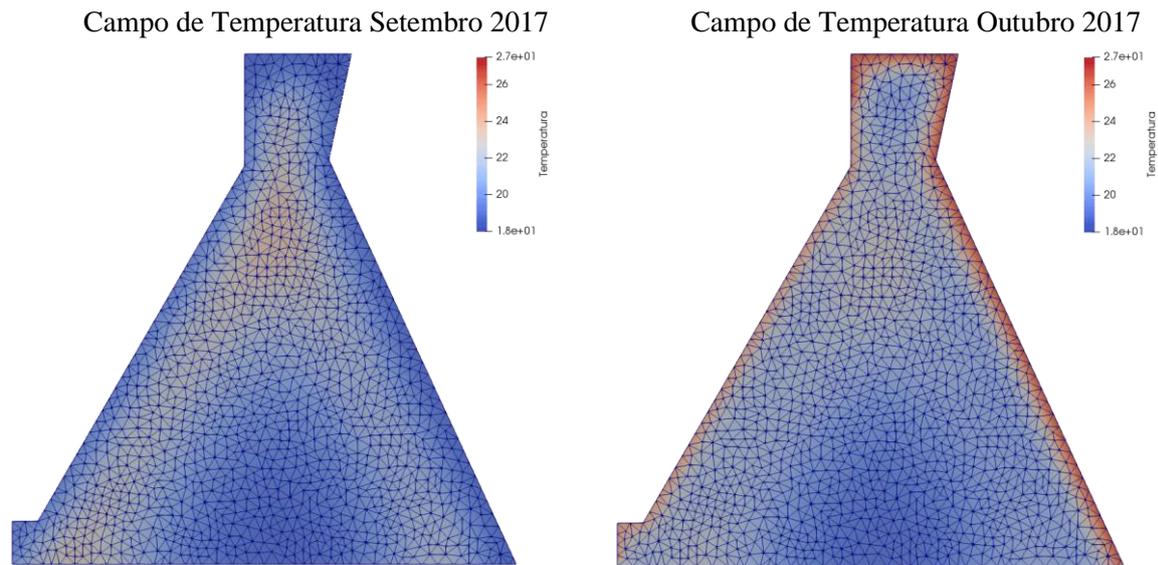


Figura 5 – Campos de Temperatura do ano de previsão 2017

5 Considerações Finais

O objetivo principal deste trabalho era o de obter 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 para o alcance desse objetivo demonstrou ser 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.

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.

References

- [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. Balliivy. Calculation of the Periodic Temperature Field in a Concrete Dam. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, N° 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. Noorzai, K.H. Bayagoob, W.A. Thanoon, M.S. Jaafar. Thermal and Stress Analysis of Kinta RCC Dam. *Engineering Structures*, Vol. 28, N° 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. Toloí. *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.