



PREVISÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE TEMPERATURA EM BARRAGEM DE CONTRAFORTES PELO MÉTODO DE HOLT WINTERS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL VIA ELEMENTOS FINITOS

Almeida AM[#], Franco EMC[#], Hickmann T^{*}, Corrêa JM^{*}, Rodrigues SB^{*}, Souza DSM^{*}, Aracayo LSA[§]

[#]Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Foz do Iguaçu, PR, Brasil; ^{}Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Medianeira, PR, Brasil, [§]Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens – Foz do Iguaçu, PR, Brasil*

Resumo. Para assegurar a segurança e detectar anormalidades, dados de temperatura são coletados diariamente em Itaipu Binacional. Isto se deve à forte influência da variação de temperaturas na formação de fissuras nas estruturas de concreto. Assim, é proposto um método de previsão de series temporais de temperatura a partir do método de Holt Winters. Para verificar a qualidade da previsão dos dados, foi realizada a simulação termodinâmica de barragem do tipo contrafortes. Para isso, a estrutura foi modelada via método dos elementos finitos e sua dinâmica foi simulada com auxílio do software ANSYS®. A série temporal de temperaturas que melhor se ajustou aos dados reais foi comparada, no ponto de interesse, com a distribuição de temperaturas em estado transiente do ano de 2017, obtida em simulação computacional. Foi obtido um MAPE de 3,22%, o que valida a previsão realizada e viabiliza a utilização dos resultados para a determinação de deslocamentos na estrutura em trabalhos futuros.

Palavras-chave: *Holt Winters, Elementos Finitos, ANSYS, segurança de barragens, Itaipu Binacional.*

Introdução. Construída de 1975 a 1982, a barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHE) é constituída pelas estruturas de concreto, enrocamento e terra. Sua estrutura, com 7919 metros de extensão, possui cerca de 12,3 milhões de metros cúbicos de concreto, o que a torna referência nos estudos de concreto e segurança de barragens (1).

Neste sentido, esta construção é constantemente monitorada quanto à temperatura interna, externa, deslocamentos e deformações, uma vez que sua estrutura de concreto está sujeita a cargas térmicas externas associadas à radiação solar e à temperatura do ar, fundação e reservatório. Estas cargas térmicas podem ocasionar alterações volumétricas, exceder a resistência à tração do concreto, e conseqüentemente levar ao desenvolvimento de fissuras (4).

Para minimizar o potencial risco de ruptura da estrutura, os dados coletados a partir de instrumentos de monitoramento são constantemente analisados, sobretudo quanto às dinâmicas de



transferência de calor. Isto se verifica devido à forte influência das oscilações de temperatura em blocos de concreto, as quais estão relacionadas ao surgimento de tensões de origem térmica na estrutura, e podem comprometer seus requisitos de desempenho, segurança e durabilidade (4).

Sendo assim, este trabalho propõe um método de previsão do campo de temperaturas da estrutura de concreto de Itaipu compreendida pela barragem de contrafortes. A escolha do bloco do tipo contrafortes, dentre os demais tipos presentes, se deve à presença de termômetros superficiais e internos à estrutura, cujos registros de leituras estão disponíveis em maior quantidade ao longo do tempo.

Materiais e métodos. Foram coletados os dados de temperatura do Bloco D38 da estrutura de contrafortes compreendidos entre os anos 2000 a 2016. Sobre estes dados foram aplicados os métodos de suavização exponencial de Holt Winters aditivo com e sem amortecimento, e multiplicativo com e sem amortecimento. Após validada, série temporal que melhor se ajustará aos dados reais permitirá representar uma estimativa de previsão do comportamento da temperatura na estrutura para o ano de 2017.

Método de Holt Winters. O método de Holt Winters é uma variação do método de Holt desenvolvida por Winters (7) para análise e previsão de series temporais. Para esta análise é necessário conhecer os valores passados da variável de interesse, com dados espaçados adequadamente ao longo do tempo, de modo que seja possível extrair um padrão de comportamento, e assim obter condições de prever valores futuros da série. O padrão resultante permite caracterizar o comportamento sazonal, o efeito de tendência e as variações irregulares, mas para isso é necessário que o período coberto seja suficientemente longo.

O método de Holt Winters divide-se em dois grupos, sendo eles o modelo multiplicativo e o modelo aditivo. No primeiro, a amplitude de variação sazonal aumenta ou diminui em função do tempo, enquanto no segundo a variação sazonal é constante. Para identificar qual dos grupos melhor se adequa ao caso estudado, ambos foram calculados.

Para o cálculo do modelo multiplicativo foram utilizados os modelos matemáticos descritos pelas equações 1 a 4, enquanto para o cálculo do modelo aditivo foram utilizadas as equações 3,5, 6 e 7 (8).

$$\hat{Z}_{t+k} = (L_t + kT_t)S_{t-s+k} \quad (1)$$



$$L_t = \alpha \frac{Z_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (2)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (3)$$

$$S_t = \gamma \frac{Z_t}{L_t} + (1 - \gamma)S_{t-s} \quad (4)$$

$$\hat{Z}_{t+k} = (L_t + kT_t) + S_{t-s+k} \quad (5)$$

$$L_t = \alpha(Z_t - S_{t-s}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (6)$$

$$S_t = \gamma(Z_t - L_t) + (1 - \gamma)S_{t-s} \quad (7)$$

onde a componente \hat{Z}_{t+k} relaciona-se à previsão, L é a componente de nível, T indica a tendência e S a sazonalidade. Os valores das constantes de suavização α , β e γ são arbitrários.

A previsão de series temporais obtida a partir do método de Holt Winters que melhor se aproximará com os dados reais será comparada a uma série temporal obtida computacionalmente, por meio da solução da equação de difusão de calor aplicada a elementos finitos.

Para satisfazer as condições de contorno de temperatura do sistema dinâmico, serão utilizadas as series temporais de temperatura dos anos de 2015 e 2016, e os resultados serão comparados à previsão por Holt Winters utilizando a média percentual absoluta do erro (MAPE – Mean Absolute Percentage Error). De acordo com Lewis (5), um valor MAPE abaixo de 10% indica uma previsão muito boa, entre 10% e 20% indica uma previsão potencialmente boa, enquanto valores acima de 30% indicam uma previsão inexata.

Modelagem no software ANSYS®. ANSYS® é um software CAE (Computer Aided Engineering ou Engenharia Auxiliada por Computador) capaz de realizar análises estáticas e dinâmicas de transferência de calor, utilizando a modelagem matemática baseada no método dos elementos finitos de Galerkin para solucionar a equação da difusão de calor.

Método dos elementos finitos de Galerkin. O método dos elementos finitos consiste em dividir o domínio do problema em subdomínios, onde cada subdomínio é composto por elementos volumétricos que formam uma malha, e representados por um conjunto de equações que serão combinados e solucionarão o problema de difusão de calor para o elemento como um todo (3).

Para a solução do sistema, o método de resíduos ponderados de Galerkin encontra uma função que aproxima a solução exata de uma equação diferencial (tal como a equação da difusão de calor) avaliada em um determinado intervalo, para cada elemento. Seu grau de precisão melhora quanto menor for o intervalo considerado, e o procedimento consiste em minimizar o erro de

aproximação, ajustando funções de teste na EDP. O resíduo é o erro causado pelas funções de teste, e as funções-peso são funções de aproximação polinomial que projetam o resíduo (2)

Assim, o processo elimina todas as derivadas parciais da equação diferencial parcial (EDP) de difusão de calor, aproximando assim a EDP localmente em um conjunto de equações diferenciais ordinárias, que são resolvidas por integração numérica usando técnicas padrão, como o método de Euler ou Runge-Kutta (2).

Definição do modelo e malha. Para que o ANSYS® aplique o método das diferenças finitas de Galerkin, foi gerado um modelo tridimensional simplificado na plataforma *workbench* do ANSYS®, onde o bloco D38 da barragem foi desenhado desconsiderando a presença de chanfros, drenagem, suportes e vigas. Em seguida, este foi dividido em partes menores, chamadas “sólidos”, respeitando as dimensões reais da estrutura (Figura 1).

Logo após o modelo geométrico foi submetido ao procedimento de geração da malha tridimensional. Para isso, cada sólido foi fragmentado em elementos menores e de geometria do tipo hexaédrica (Figura 1), de modo a elevar a qualidade da malha gerada. A Figura 2 indica o número de elementos em função da qualidade da geometria de cada um, numa escala de 0 a 1, onde 1 significa qualidade máxima. É importante que os elementos finitos tenham elevada qualidade, afim de evitar problemas de convergência e inexatidão nos resultados.

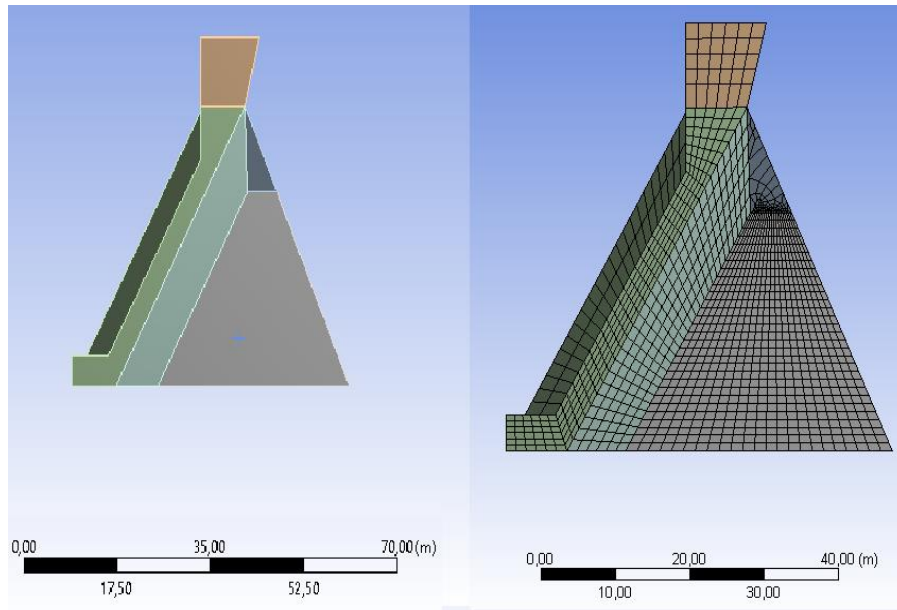


Figura 1 – Modelo geométrico e malha de elementos finitos do modelo tridimensional do bloco D38.

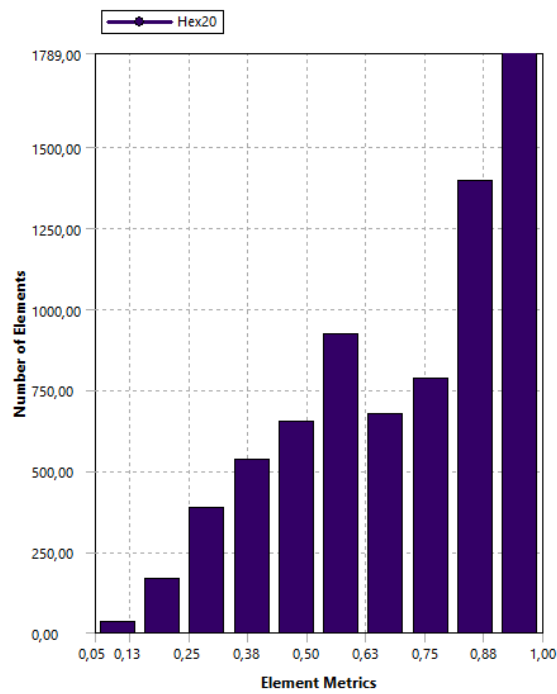


Figura 2 – Qualidade dos elementos finitos gerados.

Definição das propriedades e condições de contorno. Foram adotadas algumas simplificações em relação ao modelo térmico computacional, como ausência de fonte geradora de calor, homogeneidade do material, comportamento isotrópico e elástico linear. A Tabela 1 demonstra as constantes físicas consideradas para os cálculos termo estruturais realizados no ANSYS®.

Tabela 1 – Constantes físicas adotadas para a simulação

Parâmetro	Valor
Densidade (kg/m ³)	2600
Coefficiente de expansão térmica (C-1)	1,4 E-5
Módulo de Young (Pa)	37350
Módulo de Compressibilidade (Pa)	1,9453E+10
Módulo de Cisalhamento (Pa)	1,5826E+10
Tensão de Ruptura (Pa)	5E+6
Compressão de Ruptura (Pa)	4,1E+7
Condutividade térmica isotrópica (W/m.K)	1,8492
Calor específico (J/Kg.K)	895,98

As condições de contorno da simulação térmica foram definidas a partir dos dados dos termômetros superficiais TS-D-004 e TS-D-003, sobre os anos de 2015 e 2016, considerando que a temperatura registrada em cada um é a mesma para toda a face da geometria tridimensional na qual estão posicionados. Internamente, foi considerada uma temperatura média inicial de 18 °C (Figura 3).

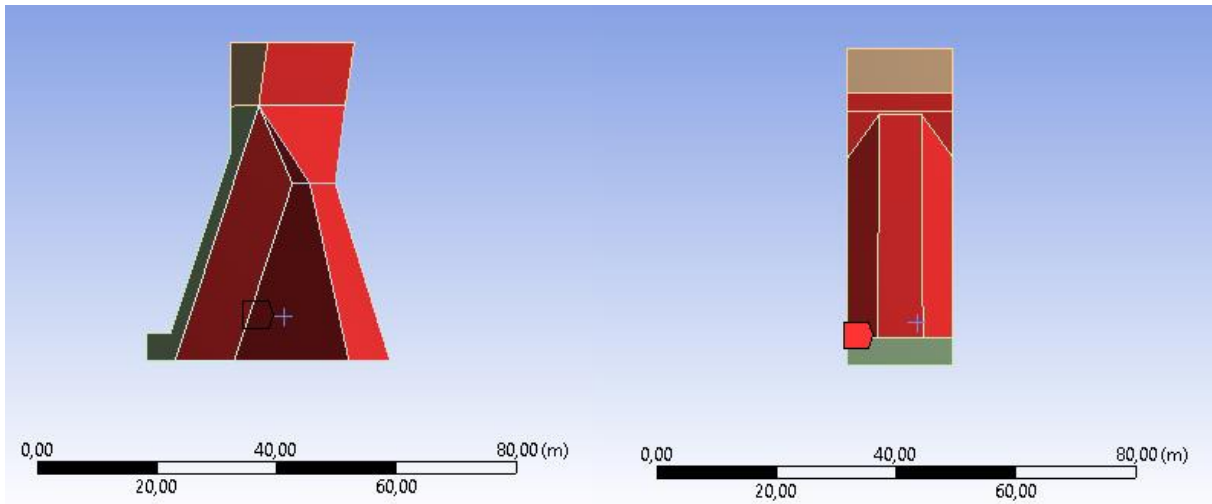


Figura 3 – Condições de contorno para a simulação térmica transiente.

Por fim, as condições de contorno da simulação estrutural foram determinadas ao considerar a ação da aceleração gravitacional, a restrição de movimento na fundação da estrutura e a liberdade dos movimentos laterais entre cada bloco, no sentido da jusante à montante (ou vice-versa).

Resultados e discussões. Inicialmente, foram obtidas as series temporais de previsão, a partir do método de Holt Winters com fator multiplicativo com e sem amortecimento (Figuras 4 e 5) e fator aditivo com e sem amortecimento (Figuras 6 e 7).

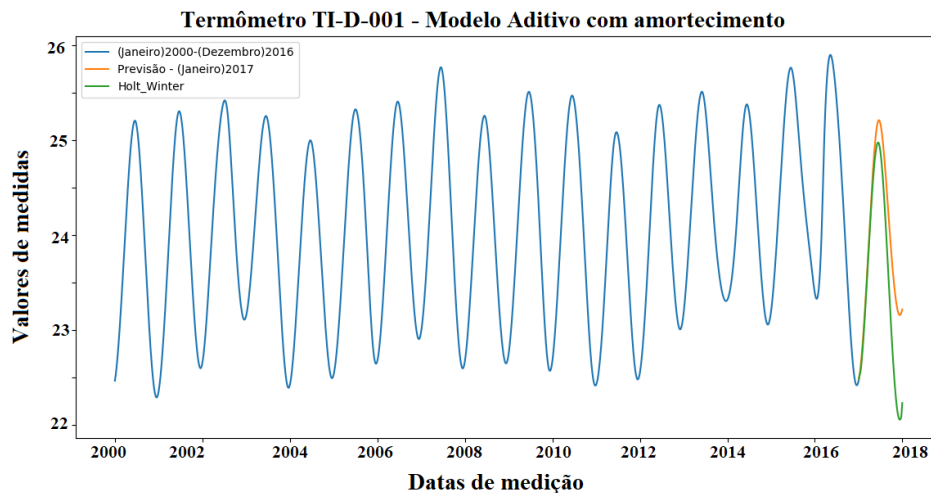


Figura 4 – Série temporal de temperaturas obtidas com o modelo aditivo com amortecimento.

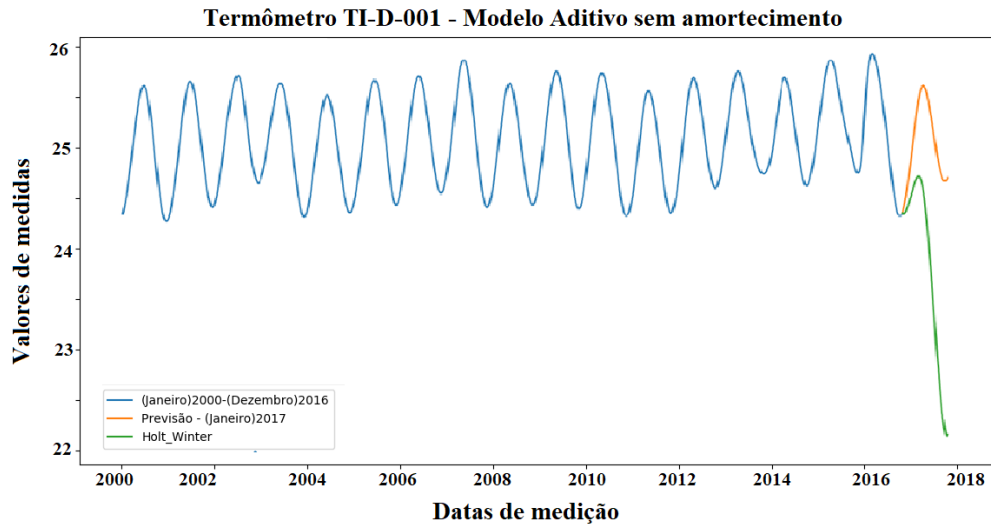


Figura 5 – Série temporal de temperaturas obtidas com o modelo aditivo sem amortecimento.

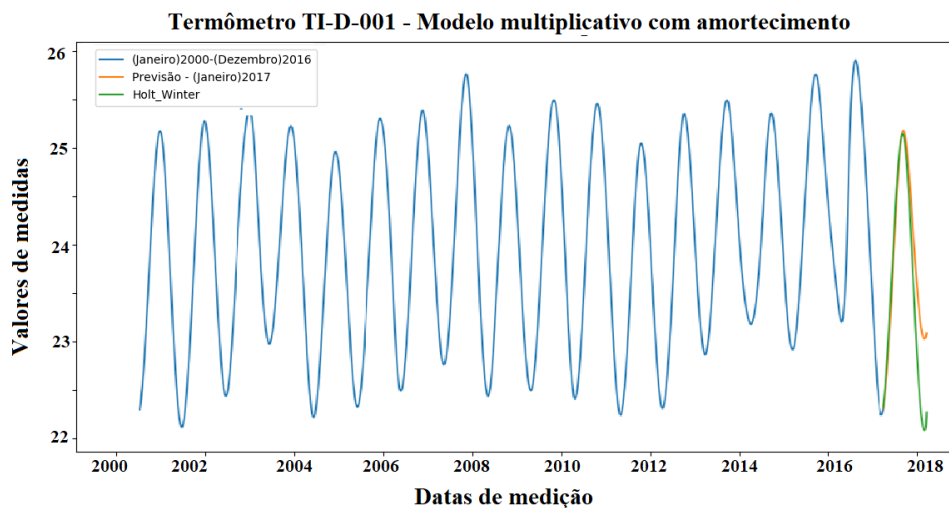


Figura 6 – Série temporal de temperaturas obtidas com o modelo multiplicativo com amortecimento.

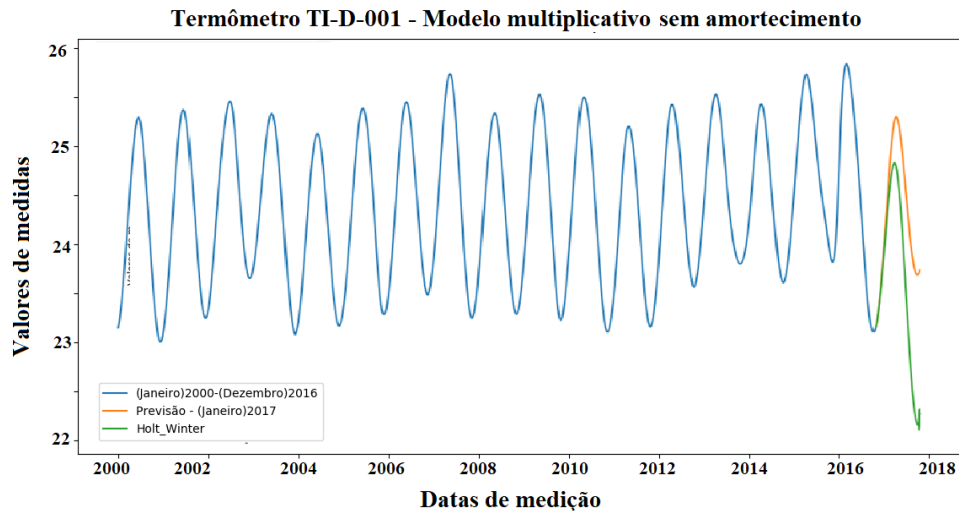


Figura 7 – Série temporal de temperaturas obtidas com o modelo multiplicativo sem amortecimento.

Dentre os quatro modelos de previsão aplicados, observamos que a previsão que mais se aproxima da distribuição de temperaturas verdadeira é obtida a partir do modelo multiplicativo com amortecimento, pois, para a mesma escala, a curva de dados previstos deste modelo é a que mais se aproxima dos dados verdadeiros, em relação às demais.

Para validar este resultado, um modelo tridimensional do bloco D38 foi simulado computacionalmente, pelo método dos elementos finitos de Galerkin com o auxílio da ferramenta ANSYS®. Ao final da simulação, foi obtida a distribuição de temperaturas para cada intervalo de tempo definido (passo de tempo). A figura 8 ilustra a distribuição de temperaturas obtida.

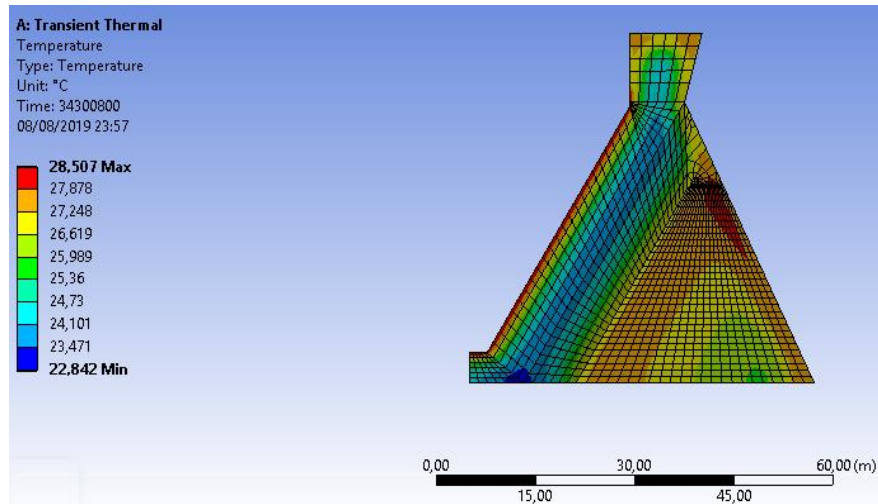


Figura 8 – Distribuição de temperaturas no modelo.

Foi selecionado um ponto de interesse que contém um termômetro interno instalado TI-D-001 na estrutura real (Figura 9). Sobre este ponto foram extraídas as temperaturas calculadas para todo o período, a fim de compará-las com os dados reais disponíveis a partir do instrumento instalado. A superposição das curvas de temperatura real e simulada pode ser observada a seguir (Figura 10).

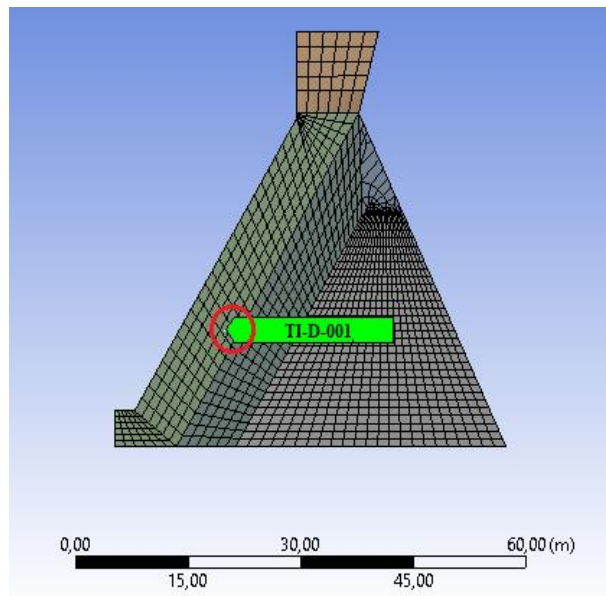


Figura 9 – Localização do termômetro interno para a comparação dos dados reais e simulados. A imagem mostra a posição em relação à face lateral do modelo.

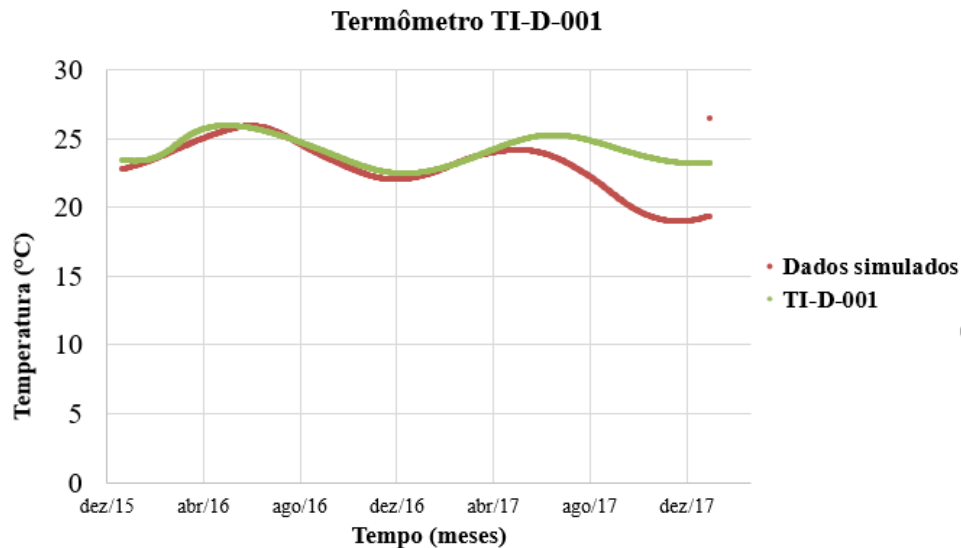


Figura 10 – Distribuição dos dados reais e simulados ao longo do tempo.

Os dados de temperatura simulados obtiveram um MAPE de 3,22%, ou seja, a previsão não está adequada em apenas 3,22% dos dados. Sendo assim, pode-se afirmar que a simulação obteve uma previsão da dinâmica transiente de temperaturas satisfatória, pois seu MAPE é inferior a 10%. Assim, os resultados podem ser aplicados como condição de contorno para a determinação da dinâmica estrutural, para que, por fim, sejam previstas as deformações na barragem de concreto em trabalhos futuros.

Conclusão. Conclui-se que, a partir do estudo e aplicação das técnicas de previsão de Holt Winters, a série temporal de temperaturas do instrumento TI-D-001 foi melhor prevista para o ano de 2017 pelo método multiplicativo com amortecimento, dentre as outros métodos empregados. Esta hipótese foi validada ao construir um modelo dinâmico computacional e testá-lo, utilizando a ferramenta ANSYS® baseada no método dos elementos finitos de Galerkin.

A partir da simulação realizada, foi obtida uma série de temperaturas, na mesma posição do termômetro TI-D-001 do modelo do bloco D38, com MAPE de 3,22% em relação à série de temperaturas previstas. Consequentemente, é possível utilizar a distribuição de temperaturas do modelo como condição de contorno para a determinação da dinâmica estrutural, e, por fim, prever as deformações na estrutura da barragem de contrafortes de Itaipu, em trabalhos futuros.



Agradecimentos. Agradecemos ao CEASB (Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens) pela concessão do espaço, dados e equipamentos para a elaboração deste trabalho. Agradecemos à ITAIPU Binacional pelos recursos cedidos e pelo fomento à pesquisa realizada.

Referências

- (1) Itaipu Binacional. (2019), “Barragem”, *Website. Foz do Iguaçu, disponível em:* <https://www.itaipu.gov.br/energia/barragem>. Acesso em 05 de agosto de 2019.
- (2) Reddy, J.N. (2006). “An Introduction to the Finite Element Method”. Terceira ed. [S.l.]: ISBN 9780071267618 McGraw-Hill.
- (3) Grandin, H. (1991), “Fundamentals of the Finite Element Method”, Waveland Press.
- (4) Maken, D. D.; Léger, P.; Roth, S. N. (2013). Seasonal thermal cracking of concrete dams in northern regions. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, American Society of Civil Engineers, v. 28, n. 4.
- (5) LEWIS, C. D. *Demand Forecasting and Inventory Control*. New York: Wiley, 1997, 157p
- (6) WINTERS, P. R. *Management Science*, v. 6, n. 3, p.324-342, 1960. [4] BROWN, R.G. *Statistical Forecasting for Inventory Control*. New York: McGraw-Hill, 1959. [5] HOLT, C.E. *International Journal of Forecasting*, v. 20, p.5-10, 2004. [6] MAKRIDAKIS, S. et al. *Forecasting Methods and Applications*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- (7) HOLT, C.E. *International Journal of Forecasting*, v. 20, p.5-10, 2004.
- (8) MAKRIDAKIS, S. et al. *Forecasting Methods and Applications*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.