

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DO TIPO HTT COM RECURSO A MEDIÇÕES DA TEMPERATURA DO AR. APLICAÇÃO AOS DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS OBSERVADOS NA BARRAGEM DO BAIXO SABOR



José António Silva
Estudante de Mestrado
CONSTRUCT - FEUP
Porto
joseantonio1999silv@gmail.com



Juan Mata
Investigador Auxiliar
LNEC
Lisboa
jmata@lnec.pt



Sérgio Pereira
Investigador
CONSTRUCT-FEUP
Porto
sbp@fe.up.pt



Álvaro Cunha
Professor Catedrático
CONSTRUCT - FEUP
Porto
acunha@fe.up.pt

SUMÁRIO

Neste trabalho apresenta-se uma proposta para o desenvolvimento de uma variante dos modelos de interpretação quantitativa do tipo HTT (*Hydrostatic, Temperature, Time*) onde o efeito térmico observado na resposta da estrutura é caracterizado a partir das medições da temperatura do ar. O caso de estudo apresentado consiste na interpretação dos deslocamentos horizontais, na direção radial, observados numa base de fio de prumo da barragem do Baixo Sabor. Os resultados obtidos no modelo HTT proposto foram comparados com os resultados do modelo de interpretação quantitativa usualmente utilizado, um modelo do tipo HST (*Hydrostatic, Season, Time*).

Palavras-chave: Barragem de betão, *Machine Learning*, Deslocamento, Controlo de segurança, interpretação do comportamento observado.

1. INTRODUÇÃO

Uma barragem de betão reúne alguns desafios no campo da análise e interpretação do comportamento observado, quer devido à alteração das propriedades dos materiais ao longo do tempo, quer resultante da variabilidade das ações a que a estrutura está sujeita e que deverão ser acauteladas no sentido de se poder inferir sobre a segurança estrutural da barragem. Sabe-se que se podem fazer previsões do comportamento de uma barragem de betão em exploração com elevado grau de confiança para situações normais, tirando partido dos valores registados através dos instrumentos que constam no sistema de observação da obra. A análise do comportamento estrutural das barragens de betão tem de ser realizada

de forma continuada, desde a sua construção, o primeiro enchimento, fulcral no ciclo de vida de uma barragem onde é sujeita pela primeira vez às ações para a qual foi projetada e depois, durante o restante período de exploração.

A instrumentação que compõe o sistema de observação de uma barragem de betão assume um papel bastante importante para a caracterização do comportamento de todo o conjunto barragem-fundação-albufeira com relação às exigências da segurança estrutural. Ao longo do tempo, os sistemas de observação começaram a integrar capacidades tecnológicas para auxiliar o trabalho humano, desde as visitas técnicas até à receção dos dados.

Os modelos expeditos usualmente utilizados para a avaliação e previsão do comportamento de todo o conjunto, sujeito a ações estáticas, foram desenvolvidos com base em modelos estatísticos de regressão, usualmente designados por modelos de interpretação quantitativa. Estes modelos sempre têm sido bastante usados nas várias áreas da engenharia civil e, na área em estudo, desempenham até hoje uma ferramenta de auxílio ao conhecimento empírico. No campo da engenharia de barragens as abordagens mais utilizadas para o desenvolvimento dos modelos de interpretação quantitativa têm sido as HST e HTT, que serão explicadas com maior detalhe na secção seguinte.

Estas ferramentas têm-se mostrado eficazes, mas o interesse em promover a redundância de modelos e a melhoria dos desempenhos destes mesmos modelos, leva a que se continue a estudar novas variantes às metodologias existentes. Assim, neste trabalho propõe-se uma metodologia para o desenvolvimento de modelos de interpretação quantitativa do tipo HTT com recurso a medições da temperatura do ar. No caso de estudo será analisado o deslocamento radial observado, através do sistema de recolha automática do sistema de observação, numa base de fio de prumo da barragem do Baixo Sabor.

2. MODELOS DE INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DO TIPO HST E HTT

Dentro dos modelos de interpretação quantitativa um dos métodos mais utilizados para a otimização dos parâmetros é o de regressão, que estabelece a ligação entre variáveis de entrada e de saída. Um exemplo disso é a Regressão Linear Múltipla que usa uma relação linear entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes.

Os modelos de interpretação quantitativa tiram partido do conhecimento da obra para definir os termos independentes a utilizar para a definição da relação entre a variação de cada solicitação e a correspondente resposta. Esta relação é feita por meio de expressões analíticas paramétricas que contêm funções associadas a coeficientes determinados por calibração estatística. Os coeficientes da regressão e a constante são tradicionalmente obtidos através da aplicação do método dos mínimos quadrados.

A abordagem mais comum para o desenvolvimento de modelos expeditos no campo da engenharia de barragens designa-se por HST (*Hydrostatic, Season, Time*). Esta abordagem baseia-se na hipótese de que a grandeza em estudo, como são os deslocamentos horizontais, são resultado da combinação dos efeitos da carga hidrostática, da variação

sazonal da temperatura representada de forma simplificada através de funções sinusoidais, e do efeito do tempo.

A abordagem do tipo HTT (*Hydrostatic, Temperature, Time*) difere da abordagem HST na componente referente ao efeito térmico. Neste caso o efeito da temperatura é representado através das temperaturas medidas no corpo da obra ou de registo noutros locais, como a temperatura do ar medida numa estação meteorológica.

Ambas as abordagens têm como base alguns princípios, como por exemplo, os efeitos serem independentes, embora se reconheça a existência de alguma correlação entre si, sendo exemplo disso a influência que o nível de água na albufeira tem na resposta térmica da barragem, dado que a temperatura do ar e da água diferem.

Este método estatístico, com base nestas abordagens, é prestimoso quando as funções que o compõem são capazes de estimar o comportamento da grandeza. Para isso as observações devem respeitar os períodos durante os quais não ocorram alterações estruturais importantes. Também se supõe que a resposta da barragem pode ser separada em efeitos reversíveis e irreversíveis.

Para tal, a expressão que se adequa é apresentada como (1):

$$\delta(h_i, s_i, t_i) = U_h(h_i) + U_s(s_i) + U_t(t_i) + k + \varepsilon_i \quad (1)$$

Em que,

- $\delta(h_i, s_i, t_i)$ - Valor observado da grandeza em análise na observação i , que depende da pressão hidrostática, da temperatura e do instante em que se realiza a observação;
- $U_h(h_i), U_\theta(s_i), U_t(t_i)$ - São, respetivamente, as parcelas das grandezas correspondentes ao efeito elástico do nível de água na albufeira, ao efeito elástico da variação sazonal da temperatura e ao efeito do tempo na $i^{\text{ésima}}$ observação;
- k - Constante que corresponde à diferença entre valores observados e calculados no início do período de calibração;
- ε_i - Resíduo da $i^{\text{ésima}}$ observação, dado pela diferença entre o valor estimado e o valor observado.

Cada uma das parcelas corresponde a uma grandeza e podem ser aproximadas pelo somatório das funções das ações correspondentes [1] e [2], conforme se apresenta nas seções seguintes.

Efeito do nível da água na albufeira

A componente do efeito do nível da água na albufeira é considerada reversível, aproximada de uma função polinomial habitualmente até à quarta ordem (2) que depende de h , altura da água no reservatório.

$$U_h(h) = a_1 * h^4 + a_2 * h^3 + a_3 * h^2 + a_4 * h \quad (2)$$

Sendo,

- h - Altura de água na albufeira (m);
 a_1, a_2, a_3, a_4 - Coeficientes a ajustar.

Efeito da temperatura

A influência reversível dos efeitos térmicos está diretamente relacionada com as variações sazonais da temperatura. Na abordagem HST, este efeito é simulado pela aproximação de funções sinusoidais de período anual. Assim, esta evolução pode ser considerada através da sobreposição de funções sinusoidais periódicas de período anual.

A onda térmica anual é caracterizada pelos seguintes termos (3):

$$U_{\theta}(\theta_1)^{annual} = b_1 * \cos(\theta_1) + b_2 * \sin(\theta_1) + b_3 * \sin^2(\theta_1) + b_4 * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_1) \quad (3)$$

com,

$$\theta_1 = \frac{2 * \pi * t_d}{365} \quad 1 \leq t_d \leq 365 \quad (4)$$

onde,

- t_d - Número de dias decorridos desde o início do ano até à data da observação;
 b_1, b_2, b_3, b_4 - Coeficientes a ajustar.

De referir que a abordagem HTT (*Hydrostatic, Thermal, Time*), que considera a temperatura medida na obra, traz consigo a dificuldade de escolha dos termómetros instalados na barragem mais apropriados para o desenvolvimento do estudo [3] e [4].

A temperatura no corpo da barragem produz-se consoante a incidência da radiação solar e da temperatura do ar e pode ser medida através de termómetros embebidos no betão e indiretamente pelas estações meteorológicas. A análise da transferência do calor na barragem pode ser feita de diversas formas sendo que esse tema foi e tem sido estudado por diversos autores [5], [6], [4], [7] e [8].

No presente trabalho pretende-se propor modelos que utilizem apenas os dados da temperatura do ar para a caracterização do efeito da temperatura na resposta observada. A proposta neste trabalho traduz a variação da temperatura do ar diária numa função representativa das oscilações que ocorrem. Por exemplo, na variação anual da temperatura em Portugal o decréscimo da temperatura, na transição dos meses quentes para os frios, ocorre de forma mais acentuada do que o contrário, onde a subida gradual das temperaturas diárias ocorre mais suavemente. Também os valores máximos e mínimos, anualmente, não são iguais todos os anos, pelo que não é possível considerar estes aspetos com funções sinusoidais de período anual. Isto traduz-se numa dificuldade a que a abordagem HST não responde com rigor, visto que as funções sinusoidais que utiliza são simétricas e periódicas, não respondendo a essas variações. Neste trabalho propõe-se a consideração do efeito da temperatura através de uma variável que resulta de uma transformação da temperatura do ar.

$$U_T(T) = d_1 * T^*ar \quad (5)$$

com,

- T^*ar - Transformação da temperatura do ar;
 d_1 - Coeficiente a ajustar.

Efeito do tempo

O efeito do tempo na estrutura é uma componente irreversível associada aos efeitos das ações inelásticas, como os efeitos de fluência e/ou de relaxação do betão e os que se relacionam com fenómenos evolutivos como os de deterioração. Em condições de exploração normal onde são bem conhecidas as variações das solicitações principais, uma grande parte dos efeitos do tempo pode ser justificada por esse comportamento diferido do betão [2].

A combinação de funções polinomiais é frequentemente utilizada no contexto desta componente, havendo diversas formas de escrever essa equação (6), variando com o autor.

$$U_t(t) = c_1 * t^3 + c_2 * t^2 + c_3 * t + c_4 * \ln \left(1 + \frac{t}{a} \right) \quad (6)$$

Com,

- t - Número de dias entre a campanha e o início da observação;
 a - Número de dias entre o primeiro enchimento e a data do início da análise;
 c_1, c_2, c_3, c_4 - Coeficientes a ajustar.

Termo constante

A constante k reflete a diferença entre os valores observados e os calculados no início do período de calibração.

3. METODOLOGIA PROPOSTA PARA O DESENVOLVIMENTO DE MODELOS HTT COM RECURSO ÀS MEDIÇÕES DA TEMPERATURA DO AR

A abordagem HTT, embora aparente revelar vantagens logo numa formulação teórica, está relacionada com algumas dificuldades práticas associadas à utilização direta de dados da temperatura do ar como valor de entrada. A maior dificuldade prende-se com o facto de a fase da componente do efeito térmico da resposta estar desfasada da fase da onda térmica do ar, devido às características da estrutura. A metodologia proposta neste trabalho para o desenvolvimento destes modelos é seguidamente explicada (Figura 1):

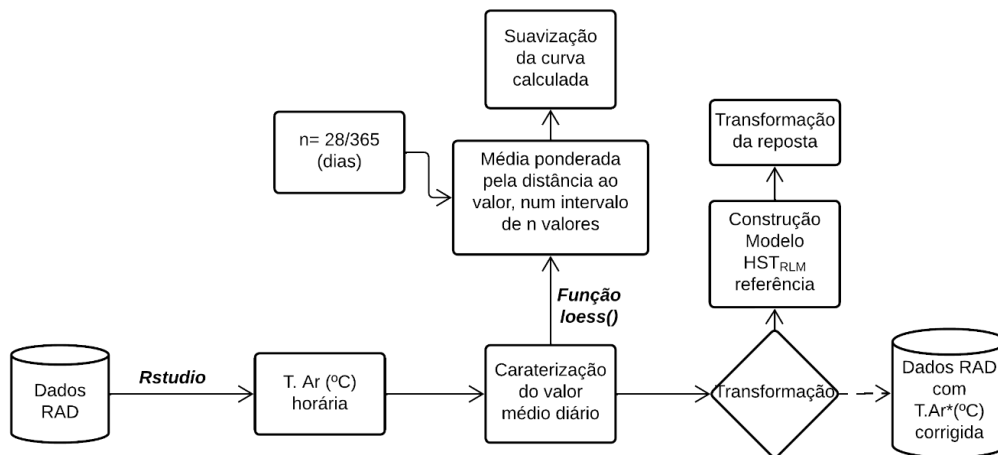


Figura 1. Metodologia proposta para o desenvolvimento de modelos HTT.

- Estando a trabalhar com valores da temperatura do ar registados automaticamente, a todas as horas, é necessário encontrar um valor representativo médio de cada dia, com intuito de formar uma curva temporal da temperatura que represente a variação anual. Para a resolução deste problema é proposta a aplicação de uma função não paramétrica que ajusta uma curva polinomial baseando-se em regressões múltiplas locais [9], com recurso ao *package loess* do *R project* [10]. Esta função trabalha localmente, dentro de uma janela definida pelo utilizador e neste trabalho foi utilizada uma janela da percentagem de dias de um mês num ano (28/365), tendo-se calculado um valor ponderado pelos pesos dos pontos vizinhos, dentro do intervalo limite definido.
- Realizado este passo, o seguinte será a identificação do desfaseamento entre a curva “suavizada” que representa a onda térmica do ar e a curva que representa o efeito térmico da resposta da estrutura. A forma escolhida para tal, consiste na aplicação da correlação cruzada para funções discretas da curva suavizada da temperatura do ar e da resposta sob análise, tendo como base o efeito térmico obtido num modelo do tipo HST. O desfaseamento adotado é aquele que origina um maior valor para a correlação cruzada entre as duas séries de valores referidas anteriormente.

Seguidamente é descrito o caso de estudo, sendo que o trabalho foi desenvolvido com recurso ao *software R project* e dos *packages loess* e *nnet* [11].no ambiente de trabalho *Rstudio* [12].

4. CASO DE ESTUDO E ANÁLISE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

4.1 Descrição da barragem do Baixo Sabor

A barragem do Baixo Sabor incorpora o aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor que é composto por duas barragens de betão. Localizado no distrito de Bragança, no troço final do Rio Sabor, que nasce na província de Zamora (Espanha) desaguando na margem direita do Rio Douro em Torre de Moncorvo.

A montante, a barragem do Baixo Sabor (Figura 2) aparece como uma barragem imponente, classificada como barragem de betão de arco com dupla curvatura, uma altura máxima de 123 m, com desenvolvimento do coroamento de 505 m, com cota inferior do paramento de cerca de 113 m, com uma largura teórica de 6 m e um volume total de betão de 670 000 m³ dividido pelos 32 blocos, que são separados por juntas de contração verticais. Na estrutura da barragem estão incluídas seis galerias de visita horizontais e uma galeria geral de drenagem que contata com a fundação. A sua albufeira tem a área de 3447 km² com capacidade útil de 630 hm³ e o NPA de 234 m [14].



Figura 2. Vista aérea da Barragem do Baixo Sabor, adaptado de [14].

4.2 Sistema de Observação da Barragem do Baixo Sabor

O sistema de observação que integra a barragem do Baixo Sabor está adaptado para as dimensões e a importância da barragem. As grandezas observadas por este sistema são: nível da albufeira; temperatura do ar e humidade do ar; temperatura do betão; deslocamentos; movimentos das juntas e fissuras; caudais drenados e infiltrados; subpressões; tensões e extensões; e vibrações.

A grandeza alvo deste estudo são os deslocamentos horizontais medidos em fios de prumo. Esses deslocamentos horizontais apresentam duas direções principais (Figura 3), a radial e a tangencial, sendo que a segunda componente apresenta valores reduzidos quando comparado com a primeira. O deslocamento horizontal é monitorizado em 27 pontos por 5 fios de prumo direito, 32 pontos de precisão transversal dentro das galerias de visita. No âmbito desta comunicação foram analisados os deslocamentos na componente radial.

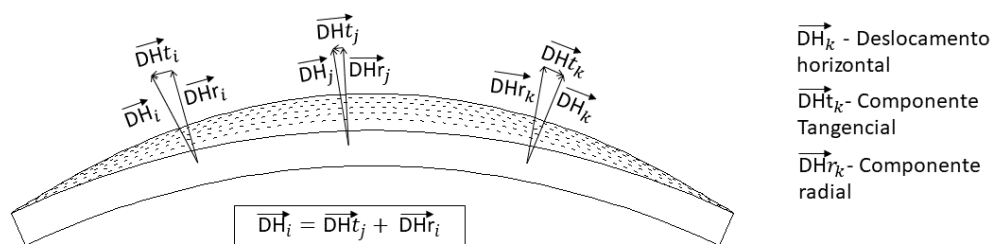


Figura 3. Componentes do deslocamento horizontal (convenção de sinais para os deslocamentos radiais: valores positivos no sentido jusante-montante).

De entre os 27 coordenómetros, para o presente trabalho foi escolhido o deslocamento radial medido no fio de prumo FP5 à cota 230,22 (m). Foram utilizadas as medições obtidas com frequência horária através do sistema de recolha automática de dados. O intervalo de tempo considerado foi entre 06-01-2017 e 29-10-2020 que totaliza um valor de 33408 registos.

Representado na Figura 4. está o deslocamento radial observado no fio de prumo FP5, pelo coordenómetro à cota anteriormente enunciada. Também consta nesta figura a cota de água da albufeira ao longo do período estudado, representado pela linha azul.

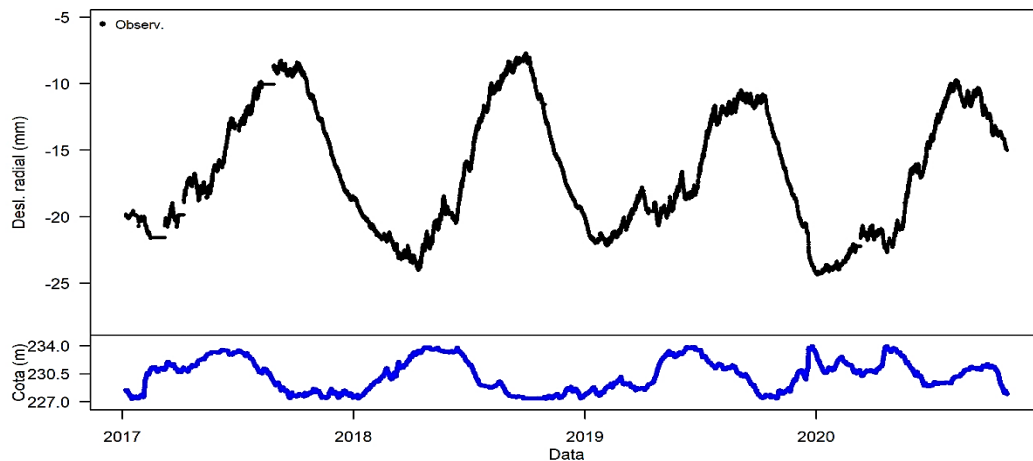


Figura 4. Representação do deslocamento radial e da cota de água na albufeira registado pelo coordenómetro do fio de prumo FP5, na cota 230,22 (m).

A Figura 5 ilustra os registos horários da temperatura do ar da estação meteorológica da barragem.

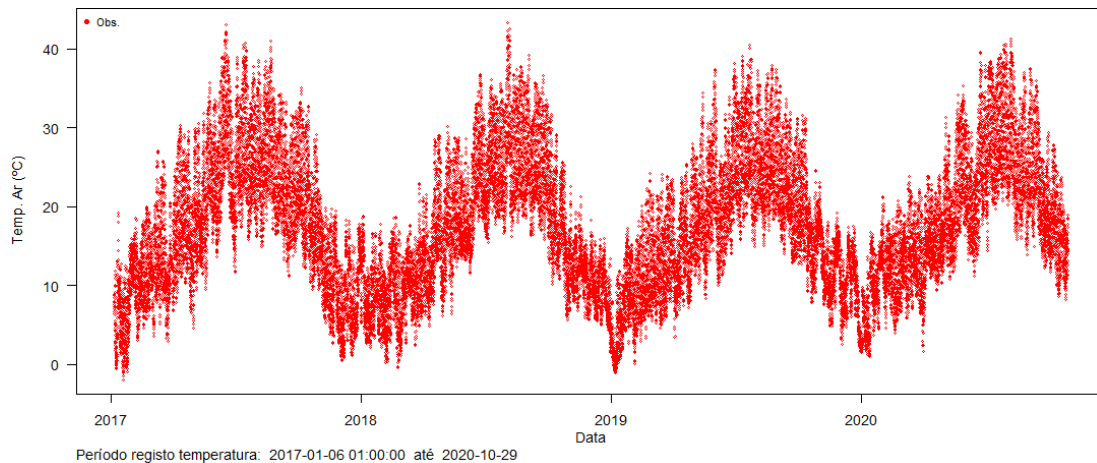


Figura 5. Registo da temperatura do ar horária

4.3 Desenvolvimento do modelo HST

O modelo desenvolvido com a abordagem HST para a caracterização do efeito térmico no deslocamento radial observado no FP5 - 230,22m, considera as seguintes funções para cada um dos efeitos:

Quadro 1. Funções utilizadas na Interpretação Quantitativa com abordagem HST

Efeito	Função
Nível da água	$U_h(h) = a_1 * h^4$
Térmico	$U_\theta(\theta_1)^{anual} = b_1 * \cos(\theta_1) + b_2 * \sin(\theta_1)$

Conforme referido, foram utilizados os dados RAD, com frequência de registo horária, no período compreendido entre 07/01/2014 e 28/02/2022. Os coeficientes associados a cada um dos termos são estimados a partir do método dos mínimos quadrados como anteriormente referido.

Na apresenta-se na Figura 6, a cor azul, as previsões obtidas modelo HST para o deslocamento radial no fio de prumo FP5, à cota 230,22 (m), e a cor preta as observações. De um modo geral, os valores previstos aproximam-se bem dos valores observados, mostrando um desempenho favorável do modelo. O desempenho deste modelo pode ser analisado também pelo gráfico dos resíduos resultante (Figura 6), onde se percebe uma dispersão de valores baixa.

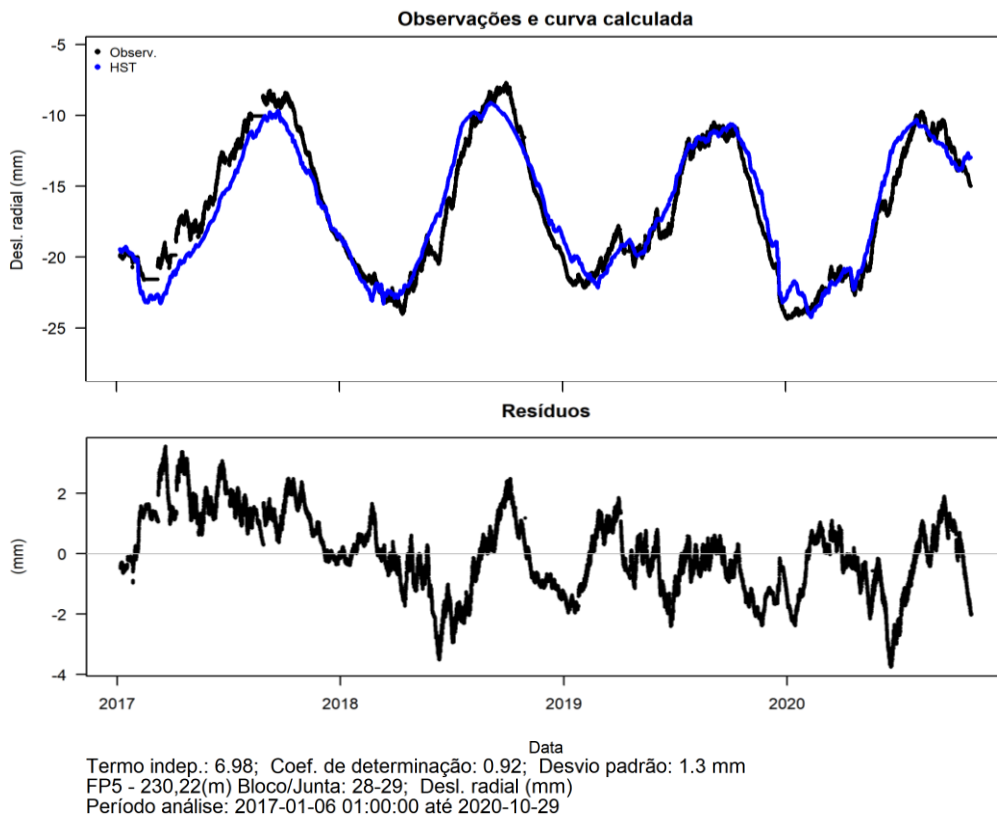


Figura 6. Deslocamento radial no FP5 - 230,22 (m): Modelo HST

O quadro seguinte traduz os valores dos gráficos produzidos por este modelo, onde se consegue ver um bom desempenho dos valores dos resíduos, com um desvio-padrão de 1,30 mm e um coeficiente de determinação (R^2) próximo da unidade, 0,921.

Quadro 2. Deslocamento radial no FP5 - 230,22 (m): Coeficientes da regressão e desempenho do modelo HST

Frequência de leitura	Coeficiente de regressão				Resíduos (mm)					
	k	H ⁴	COSD	SIND	Desvio padrão	R ²	Máx.	Mín.	Absoluto	
									Máx.	Min.
Horário	6,98	$-1,206 e^{-7}$	-3,96	-4,19	1,30	0,921	3,55	-3,76	3,76	0,00

Na Figura 7 é apresentado um gráfico com a evolução do efeito do nível da base do fio-prumo FP5-230,22m (linha a preto). Os valores negativos correspondem a movimentos no sentido montante-jusante. Sob o eixo das abcissas estão representadas, a azul, as observações do nível durante o período de avaliação.

Segundo o eixo das abcissas está representada a altura de água e segundo o eixo das ordenadas está representado o deslocamento relativo do fio de prumo nessa base, correspondente ao efeito do nível, com as unidades em milímetros. É possível verificar que a função do deslocamento do fio de prumo, representada pela linha a preto, decresce em valores negativos, o mesmo que dizer na prática que tende para jusante com o aumento do nível de água. Os traços azuis apresentados sob o eixo das abcissas representam as observações do nível durante o período de avaliação. No título do gráfico está apresentada a função adotadas e o respetivo coeficiente, neste caso com o valor de $-1,2058e^{-07}$, sendo h a altura de água na albufeira (m).

O efeito térmico é apresentado na Figura 8, onde os coeficientes ajustados pelo modelo são também apresentados, o eixo das abcissas representa os meses do ano e o eixo das ordenadas o deslocamento relativo do fio de prumo em milímetros. Os traços vermelhos apresentados sob o eixo das abcissas representam as medições durante o período de avaliação. A linha contínua a preto apresenta essa variação da resposta ao longo do ano, sendo possível observar que há uma variação sazonal em fase com as estações do ano, representativas do efeito das variações de temperatura do ar. De referir que devido às dimensões variáveis dos blocos de betão da estrutura e a respetiva inércia térmica, existe um campo de temperaturas na barragem (podendo ter valores distintos tanto nas direções margem esquerda - margem direita como em espessura nas direções montante - jusante). Isto traduz que em diferentes pontos do corpo da barragem se apresentem respostas térmicas com fases distintas da fase da onda térmica do ar.

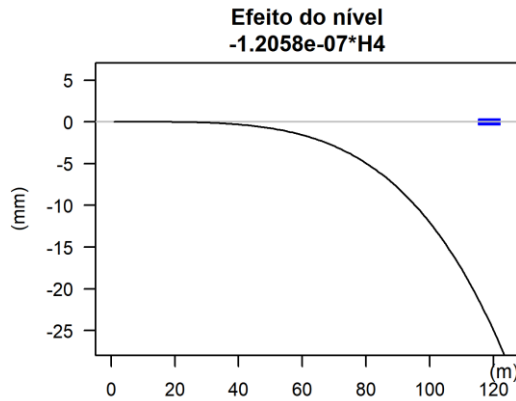


Figura 7. Efeito do nível no deslocamento radial observado na base FP5-230,22 (m)

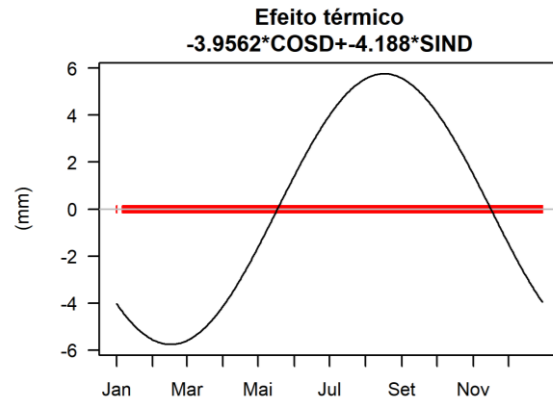


Figura 8. Efeito térmico no deslocamento radial observado na base FP5-230,22 (m)

4.4 Desenvolvimento de modelos HTT

O desenvolvimento dos modelos HTT requerem a realização dos diversos passos da metodologia anteriormente enunciada. Para tal, na Figura 9 apresenta-se a curva polinomial baseada em regressões múltiplas locais, representativa do valor médio de cada dia da temperatura do ar. A partir dos valores desta curva, elaboram-se os modelos HTT.

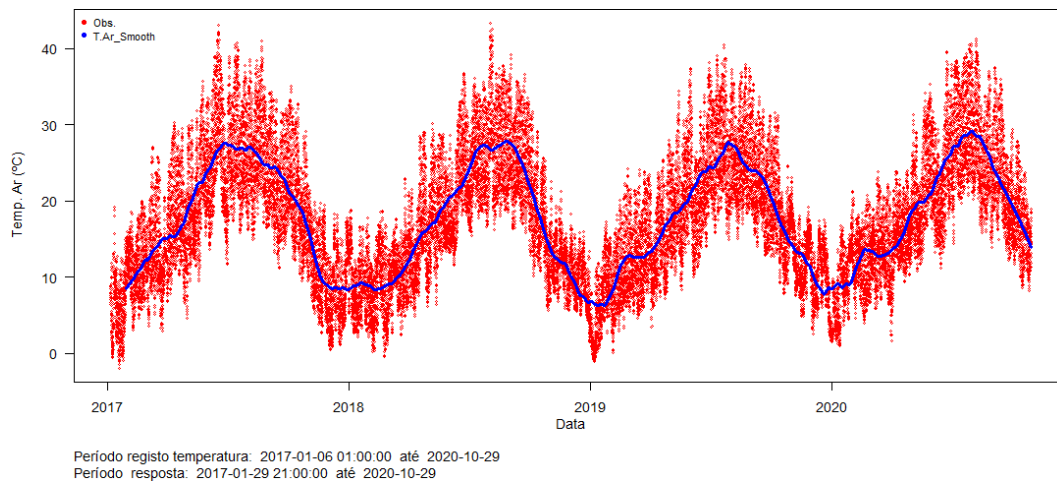


Figura 9. Curva suavizada da temperatura do ar

A Figura 10 ilustra o gráfico dos valores calculados pelo modelo, para o deslocamento radial a azul, sobrepostos aos valores observados a preto. O desempenho é bom e pode ser analisado com o gráfico dos resíduos, que apresentam baixa dispersão.

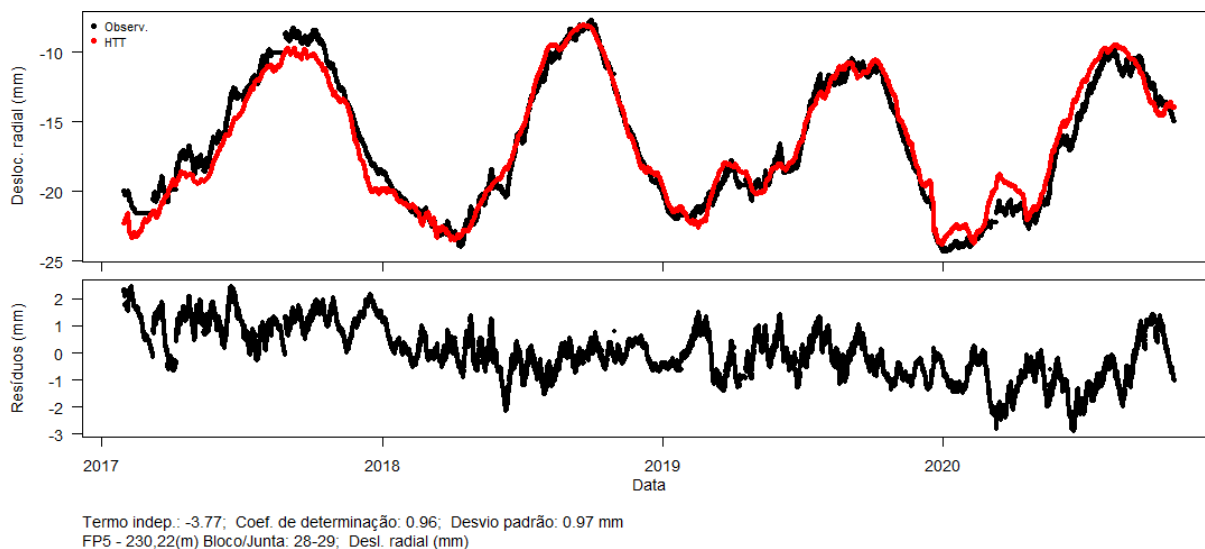


Figura 10. Deslocamento radial no FP5 - 230,22 (m): Modelo HTT

No Quadro 3 apresentam-se os valores característicos dos coeficientes de ajuste e também dos resíduos, onde é possível observar que o desvio-padrão toma valor inferior à unidade e que o coeficiente de determinação (R^2) se aproxima bastante da unidade, com valor de 0,956.

Quadro 3. Deslocamento radial no FP5 - 230,22 (m): Coeficientes da regressão e desempenho do modelo HTT

Frequência Leitura	Coeficiente de ajuste			Resíduos (mm)					
	Constante	H ⁴	T. Ar	Desvio - padrão	R ²	Máx.	Mín.	Absoluto	
								Máx.	Mín.
Horário	-3,77	$-1,20 e^{-7}$	0,61	0,97	0,956	2,47	-2,88	2,88	0,00

5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a construção dos modelos, utilizando as diferentes abordagens, podemos realizar uma comparação entre os resultados obtidos.

Os modelos de interpretação quantitativa com recurso a Regressão Linear Múltipla seguindo a abordagem HST são os usualmente utilizados numa análise expedita, pelo que os valores obtidos foram considerados como referência.

Na Figura 11 está feita uma representação das previsões dos deslocamentos radiais obtidas pelos modelos HST e HTT, e os valores observados.

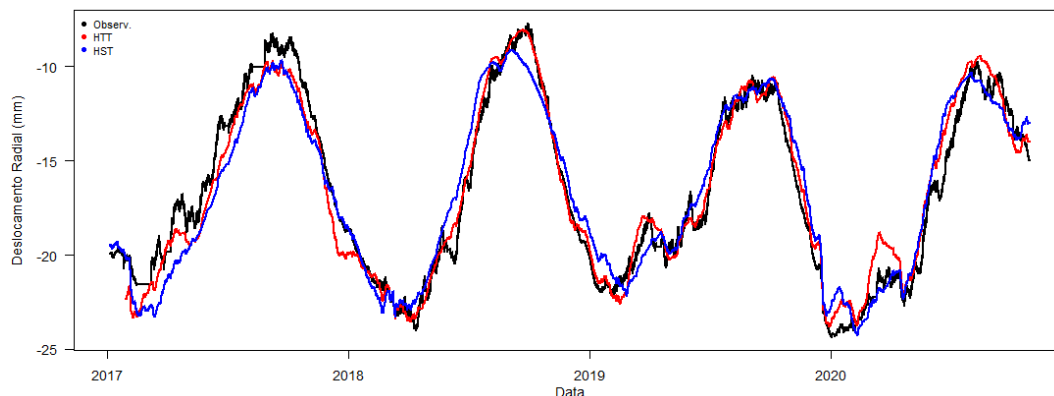


Figura 11. Comparação entre os valores previstos nos modelos HTT e HST, e os valores observados

No Quadro 4 são apresentados os valores característicos dos resíduos para ambos os modelos. Destaca-se o modelo HTT proposto, quando comparado com o modelo HST, apresenta menor valor de desvio-padrão dos resíduos, maior valor de coeficiente de determinação, R^2 , e apresenta também menores valores máximos e mínimos dos resíduos.

Quadro 4. Comparação dos resíduos entre os vários modelos com base em registo horários

Modelo	Resíduos (mm)					
	Desvio-padrão	R^2	Máximo	Mínimo	Absoluto	
					Máximo	Mínimo
HST RLM	1,30	0,921	3,55	-3,76	3,76	0,00
HTT RLM	0,97	0,956	2,47	-2,88	2,88	0,00

A partir da Figura 12, podemos finalizar as considerações anteriormente apresentadas, com a representação da distância dos valores calculados nos modelos HST e HTT aos valores observados, refletindo o que os resíduos traduziram, uma menor dispersão para o modelo com abordagem HTT.

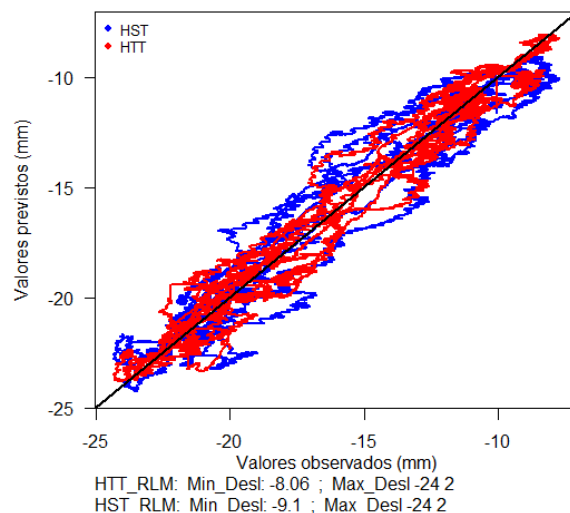


Figura 12. Deslocamento radial no FP5 - 230,22 (m): Comparação dos calculados pelos modelos HST e HTT

Em resumo, a metodologia proposta neste trabalho aparenta ser adequada para o desenvolvimento de modelos de interpretação quantitativa do tipo HTT com recurso à utilização de medições da temperatura do ar para a interpretação de deslocamentos radiais observados em fios de prumo. Para o caso de estudo o modelo HTT, comparativamente ao modelo HST, apresenta globalmente melhor desempenho, com uma diminuição do desvio-padrão dos resíduos na ordem dos 30%.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através do Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Os autores agradecem à Engie/Movhera que disponibilizou e autorizou a utilização dos dados para o desenvolvimento do caso de estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Amberg, W. - "Methods of analysis for the prediction and the verification of dam behaviour" em *Congress of the International Commission on Large Dams*, Montreal, 2003.
- [2] Mata, J. - *Aplicação de redes neuronais ao controlo de segurança de barragens de betão*. Instituto Superior Técnico, 2007.
- [3] Salazar *et al.* - "Data-Based Models for the Prediction of Dam Behaviour: A Review and Some Methodological Considerations", *Arch Computat Methods Eng*, 2017, p. 1-21.
- [4] Léger, P.; Leclerc, M. - "Hydrostatic, Temperature, Time-Displacement Model for Concrete Dams", *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, Vol. 133, pp. 267-277.

- [5] Léger *et al.* - "Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1993, Vol. 20, p. 999-1017.
- [6] Léger *et al.* - "Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1993, Vol. 20, p. 1018-1029.
- [7] Léger, P.; Seydou, S. "Seasonal Thermal Displacements of Gravity Dams Located in Northern Regions", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2009, Vol. 23, p. 166-174.
- [8] Bühlmann, M. *Statistical Methods for Dam Behaviour Analysis*. Zurich, 2018.
- [9] Cleveland, W.; Devlin, S. "Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting", *Journal of the American Statistical Association*, 1988, Vol. 83, p. 596-610.
- [10] R. C. Team - "A language and environment for statistical computing", Vienna.
- [11] Venables, W.; Ripley, B. "Modern Applied Statistics with S", Springer, New York, 2002.
- [12] R. Team - "RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio", PBC, Boston, 2022.
- [13] Gomes *et al.* - "A Barragem de Montante do Baixo Sabor. Aspectos Relevantes de Projeto e Construção" em *Encontro Nacional Betão Estrutural*. FEUP, Porto, 2012.
- [14] SECIL - "Secil-Group" [Online, Acedido a 8 abril 20]. Disponível: <http://www.secil-group.com/prizes/engenharia-2014/>.