

## **Identificação dos efeitos das reações expansivas do betão em pilares através de nivelamentos geométricos**

**Xu Min**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, xumin@lnec.pt*

**José Nuno Lima**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, jnplima@lnec.pt*

**Luís Oliveira Santos**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, luis.osantos@lnec.pt*

### **Resumo**

A ponte antiga da Foz do rio Dão é uma obra de arte inserida no IP3, cujas relevantes deficiências estruturais, principalmente decorrentes da existência de reações expansivas internas do betão, de que resulta uma fendilhação visível nos seus pilares, motivaram a sua substituição, em agosto de 2015, permanecendo, desde então, interdita ao tráfego rodoviário e pedonal.

Desde 2009, esta obra de arte tem sido objeto de diversas inspeções, incluindo subaquáticas, de estudos envolvendo ensaios laboratoriais, bem como de diversas campanhas de observação do seu comportamento estrutural, fundamentalmente baseadas na realização de nivelamentos geométricos do tabuleiro e de ensaios de caracterização dinâmica. Para além da caracterização da condição da estrutura, estas ações visaram a deteção precoce de uma eventual degradação da ponte que pusesse em causa a sua segurança, necessária numa primeira fase para manter a estrutura em serviço e, desde agosto de 2015, de forma a prevenir um colapso que poderia afetar a nova ponte.

Na presente comunicação apresenta-se o procedimento seguido no tratamento da informação recolhida pelas 19 campanhas de nivelamento geométrico realizadas deste 2009, incluindo duas campanhas realizadas após a desativação da ponte, tendo em vista determinar a evolução dos efeitos das reações expansivas do betão nos pilares desta obra de arte ao longo do período em causa. Por fim, a evolução dos resultados assim obtidos é comparada com a tendência manifestada nos 7 ensaios dinâmicos ambientais realizados no mesmo período

**Palavras-chave:** Ponte de betão; Nivelamento geométrico; Reações expansivas do betão; Regressão linear múltipla

## 1 INTRODUÇÃO

As relevantes deficiências estruturais identificadas na Ponte antiga da Foz do Dão, nomeadamente uma significativa fendilhação nos seus pilares, motivaram um conjunto de estudos, incluindo a realização de ensaios laboratoriais no LNEC em 2012, que permitiram concluir da existência de reações álcalis-agregado, com moderado potencial de evolução. A avaliação desta situação, associada às dificuldades de reabilitação dos pilares, motivaram a substituição da ponte [1], o que veio a suceder em agosto de 2015 com a inauguração de uma nova ponte [2]. Desde então a ponte antiga tem permanecido interdita ao tráfego rodoviário e pedonal.

Desde 2009, esta obra de arte tem sido objeto de diversas inspeções, incluindo subaquáticas, bem como de diversas campanhas de observação do seu comportamento estrutural, fundamentalmente baseadas na realização de nivelamentos geométricos do tabuleiro e de ensaios de caracterização dinâmica. Pretendia-se com estas ações a deteção precoce de uma eventual degradação da ponte que pusesse em causa a sua segurança, necessária numa primeira fase para manter a estrutura em serviço e, desde agosto de 2015, de forma a prevenir um colapso que poderia afetar a nova ponte.

A identificação da eventual degradação é dificultada pela variação da resposta da estrutura às ações do tráfego e às ações ambientais, designadamente a temperatura, bem como pelo comportamento diferido do betão. Torna-se, assim, necessário proceder ao adequado processamento da informação experimental para conseguir eliminar esses efeitos perturbadores.

Neste contexto, a aplicação dos modelos de regressão linear múltipla na análise dos resultados da monitorização continua ou periódica, juntamente com as informações de ações externas, como os fatores ambientais e operacionais, afigura-se conveniente para avaliar a linearidade e a elasticidade do comportamento estrutural. Os modelos estabelecidos podem ser utilizados para estimar os efeitos diferidos, como retração e fluência, bem como a deterioração da estrutura [3].

Nesta comunicação apresenta-se a aplicação destes modelos de regressão linear múltipla aos valores medidos nas 19 campanhas de nivelamento geométrico realizadas desde 2009 na ponte antiga da Foz do rio Dão, tendo em vista identificar os efeitos das reações expansivas do betão nos pilares. A evolução dos resultados assim obtidos é comparada com a tendência manifestada nos 7 ensaios dinâmicos ambientais realizados no mesmo período.

## 2 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A Ponte antiga da Foz do Dão é uma estrutura em betão armado pré-esforçado, construída na década de 70 do século XX, constituída por dois tramos de extremidade de 30 m e sete tramos intermédios de 40 m de vão, com um comprimento total de 340 m (Figura 1).

O tabuleiro é uma laje vigada, com uma largura de 15,20 m, composta por 4 vigas longitudinais, afastadas entre si de 4,00 m, e por carlingas colocadas nos eixos de apoio e a meio vão, nos tramos extremos, ou a terços vãos, nos tramos intermédios. As vigas longitudinais têm altura variável, desde 2,00 m (a meio vão dos tramos intermédios) até 2,50 m (sobre os apoios nos pilares).

Os oito pilares são constituídos por um fuste único de secção em forma de losango e vazamento interior. A altura dos pilares varia entre 20 m e 85 m. Apenas as zonas correspondentes a cerca de

15 m estão permanentemente acima da cota máxima da albufeira onde se insere a ponte. A amplitude de variação da cota da albufeira é aproximadamente de 15 m. As fundações são diretas, materializadas por meio de sapatas.



Figura 1. Vista geral da Ponte antiga da Foz do Dão

Esta ponte foi objeto de diversos estudos e inspeções visuais, incluindo inspeções subaquáticas, que permitiram detetar deficiências estruturais: o tabuleiro com deformação excessiva, zonas em que houve deficiências de vibração do betão, deficiente ligação entre juntas de betonagem; fissuras nas vigas longitudinais, sobretudo verticais, associadas a flexão e resultantes da reduzida compressão introduzida pelo pré-esforço aplicado; fendilhação nos pilares, em especial nas zonas localizadas a maior profundidade, que foram associadas à existência de reações expansivas no betão [1][4][5].

### 3 NIVELAMENTOS GEOMÉTRICOS DE PRECISÃO

A realização das campanhas de nivelamento geométrico implicou a definição de uma linha de nivelamento geométrico (LNG), apoiada num ponto considerado fixo na margem direita, isto é, um ponto que se considera não sofrer deslocamentos verticais significativos ao longo do tempo.

Esta linha de nivelamento inclui 20 pontos objeto, materializados por tacos de nivelamento instalados nos encontros da ponte e nas secções de apoio intermédio. Em cada secção observada foram instalados dois tacos de nivelamento, um do lado de montante e outro no lado de jusante, como esquematizado na Figura 2. O ponto de referência está materializado por um taco de nivelamento chumbado num maciço de betão situado na margem direita do rio Dão.

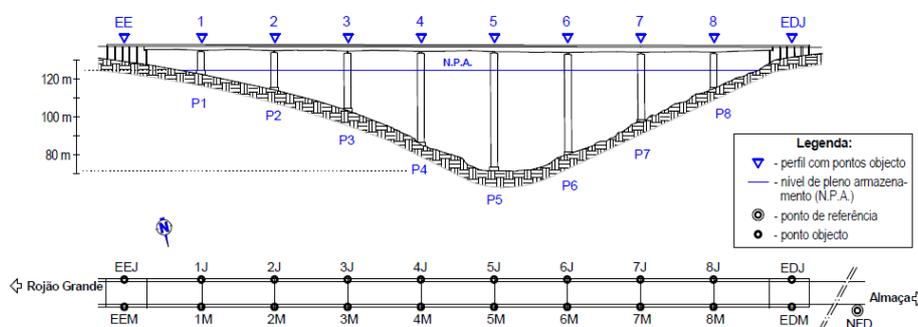


Figura 2. Localização dos pontos da linha de nivelamento geométrico

As operações de nivelamento e contra nivelamento foram realizadas de noite, devido à menor intensidade do tráfego rodoviário e de forma a evitar os efeitos perturbadores das variações térmicas diurnas. Nestas operações foi utilizado um nível de precisão Wild NA2, com micrómetro ótico GPM3,

e duas miras com escala de invar, de apoio inferior e cerca de 2 m de comprimento, equipadas com um projetor no seu topo para iluminação das escalas. Para o nível de probabilidade de 95%, o erro associado às medições é caracterizado por um desvio padrão de 0,20 mm.

Entre 2009 e 2014 a ponte foi objeto de campanhas de nivelamento geométrico do tabuleiro com uma periodicidade trimestral. Após a desativação da ponte, foram realizados dois nivelamentos, em novembro de 2017 e em novembro de 2018. No total foram realizadas 19 campanhas de nivelamento geométrico do tabuleiro, como anteriormente referido [6].

A campanha inicial, realizada em dezembro de 2009, foi tomada como referência. Os resultados das campanhas posteriores são convertidos em deslocamentos relativos à posição que ocupavam nessa primeira campanha. Os deslocamentos negativos correspondem a assentamentos e os deslocamentos positivos a subidas.

Na Figura 3 apresenta-se a evolução dos deslocamentos relativos medidos nos pontos localizados sobre os pilares mais altos (P4, P5 e P6), do lado montante. Constata-se o efeito da sazonalidade na variação das cotas medidas, que são claramente mais elevadas quando medidas no verão ou outono, entre junho e outubro. Também é possível detetar uma tendência de empoamento ao longo do período de monitorização, como indicam as linhas tracejadas.

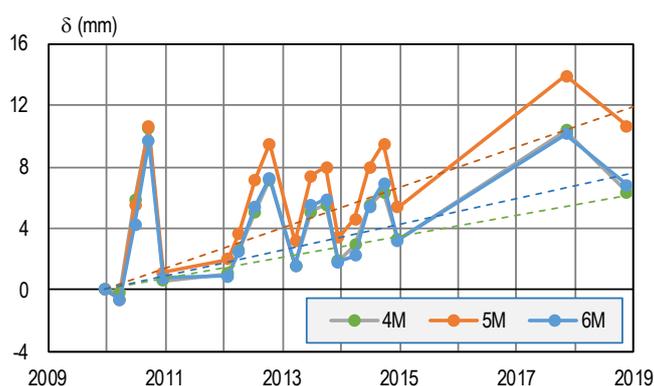


Figura 3. Evolução das diferenças de nível nos pontos objetos de pilares mais altos

Comparando apenas os valores obtidos nas campanhas realizadas em novembro ou dezembro, representados na Figura 4, pode-se verificar que ao longo do tempo a cota do topo dos pilares tem vindo a aumentar, com a exceção da última campanha, realizada em novembro de 2018.

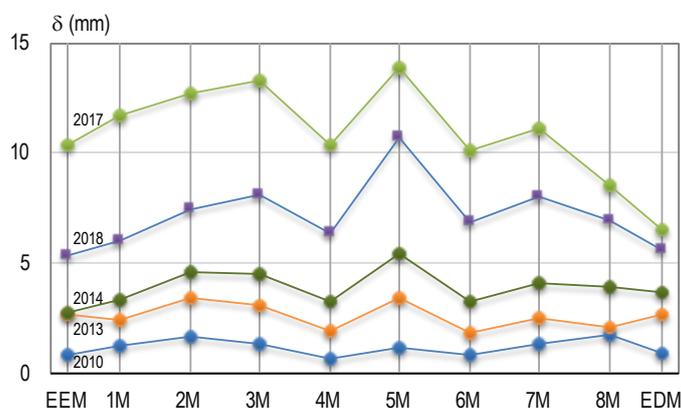


Figura 4. Diferenças de nível obtidas nas campanhas realizadas durante o inverno

#### 4 MÉTODOS DE REGRESSÃO LINEAR APLICADOS ÀS ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

A monitorização da integridade da estrutura tem como objetivo identificar alterações do comportamento estrutural que têm origem na degradação das condições de fronteira ou das propriedades físicas e geométricas da estrutura. No entanto, a variação da resposta estrutural pode também ser devida às ações externas, como condições ambientais ou operacionais.

Para detetar mudanças no comportamento da estrutura, uma ferramenta muito útil é a análise estatística dos dados experimentais obtidos ao longo período, nas diversas condições ambientais e operacionais [3][7]. Para efeito, aplica-se a técnica de Regressão Linear Múltipla (MLR), com objetivo de estimar os efeitos das ações consideradas nos parâmetros medidos e identificar os eventuais desvios anormais.

No caso de não haver degradação da estrutura, e uma vez que o desenvolvimento da retração e da fluência do betão se encontra concluído, atendendo à idade da ponte, a variação da resposta estrutural observada será apenas devida ao efeito das ações. Nestas circunstâncias, as ações estão normalmente dentro dos limites previstos e a estrutura encontra-se a funcionar em regime elástico linear, portanto é razoável presumir que cada uma das ações provoca uma resposta da estrutura com caráter linear. A correlação entre as ações e a resposta estrutural pode então ser definida através da regressão linear múltipla (RLM):

$$y = A_0 + \sum_{j=1}^n A_j x_j + \varepsilon \quad (1)$$

onde  $y$  é a resposta estrutural observada,  $x_j$  é regressor (ações),  $A_j$  é coeficiente de regressão, definido através da minimização da soma dos erros ( $\varepsilon$ ) quadráticos.

Os erros ( $\varepsilon$ ) resultantes da diferença entre os dados adquiridos *in situ* e as estimativas dos modelos definidos pela regressão linear permitem detetar a ocorrência de alterações no comportamento observado da estrutura.

No caso em análise, os deslocamentos medidos apresentam efeitos sazonais, presumindo-se que fortemente associados à temperatura do ar. No entanto, o nível da água da albufeira da barragem da Agueira, na qual a ponte está inserida, também tem ciclos anuais de enchimento e vazamento, pelo que foi incluído no modelo como um potencial regressor. Na Figura 5 apresentam-se as variações da média diária da temperatura do ar e do nível de água da albufeira no período de monitorização. As linhas tracejadas marcam as datas das campanhas de nivelamento geométrico de precisão e dos ensaios dinâmicos realizados.

Como referido inicialmente, as anomalias nos pilares desta ponte, nas zonas localizadas a maior profundidade, foram associadas à existência de reações expansivas no betão, confirmadas através dos ensaios laboratoriais realizados pelo LNEC [8]. O progresso das reações expansivas depende de vários fatores, designadamente a composição do betão, a temperatura, a humidade e o campo de tensões, para além do tempo. A curva de expansão livre tem uma configuração sigmoide (Figura 6), sendo caracterizada por um tempo de latência ( $\tau^l$ ), momento em que a reação acelera, aumentando a difusão dentro do material devido à microfissuração, e  $\tau^c$ , o tempo característico, que pertence à fase de atenuação do fenómeno [9]. A idade da obra, bem como a diminuição da progressão das anomalias identificadas, permite inferir que os fenómenos expansivos se encontram na fase de atenuação [10].

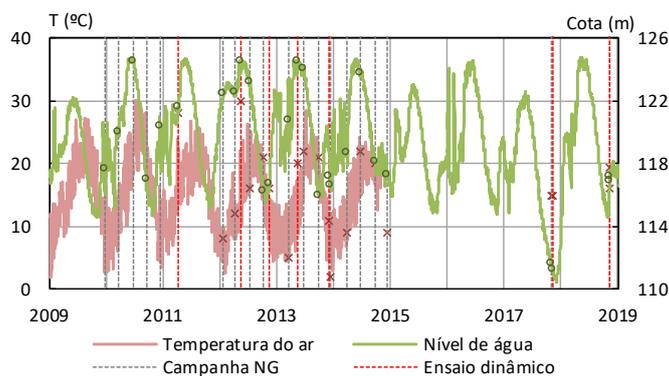


Figura 5. Temperatura do ar e cota da albufera

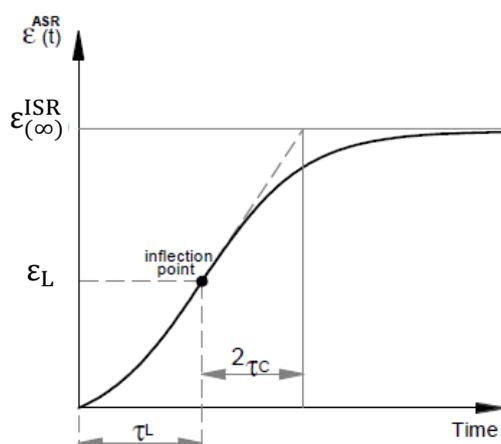


Figura 6. Curva de expansão livre

Para apurar as causas das variações da cota do topo dos pilares, nomeadamente da sua aparente subida, no período entre 2009 e 2018, foi aplicado o método de regressão linear múltipla para separar os efeitos dos fatores acima referidas: a cota da albufera ( $x_h$ ), a temperatura média diária do ar ( $x_T$ ) e o tempo, em dias, decorrido desde a 1ª campanha ( $x_D$ ), considerando que o processo de degradação com origem de reação expansiva é uniforme ao longo do período de monitorização.

As campanhas de observação foram realizadas em dois períodos, 2009 a 2014 e 2017 a 2018 (Figura 5), estando a ponte aberta ao tráfego no primeiro período e desativada no segundo período. Para clarificar se houve a alteração no processo de degradação da estrutura ao longo do tempo, foi aplicada a metodologia que se descreve seguidamente.

Considerando como de referência o período com a ponte em serviço, foram constituídos modelos RLM para as variações altimétricas medidas nos pilares e encontros. Os erros de estimação dos modelos RLM são caracterizados estatisticamente para definir o intervalo de confiança dos modelos RLM obtidos. Com base nos modelos RLM obtidos, realiza-se a previsão para as cotas dos pilares e compara-se com os valores observados nas campanhas de 2017 e 2018. Se as diferenças entre as previsões dos modelos RLM e os valores observados, denominadas desvios, se encontram dentro dos intervalos de confiança, então as respostas da estrutura são classificadas como inalteradas. Caso contrário, considera-se que ocorreram alterações no processo de degradação da estrutura.

Foi efetuada uma análise estatística para determinar se o modelo RLM proposto é estatisticamente significativo. A análise de variância ANOVA (*ANalysis Of VAriance*) foi aplicada para verificar se as variáveis consideradas são úteis para as variáveis da resposta, sendo a hipótese nula a seguinte:

$$H_0: A_n = A_T = A_D = 0 \quad (2)$$

Se a probabilidade do valor F de Fisher-Snedecor for maior do que o valor determinado para o nível de significância a 0,05 (distribuição F de Fisher-Snedecor), a hipótese nula é rejeitada, ou seja, o conjunto das variáveis de entrada é significativo para o modelo. No caso de o valor F ser inferior a 0,05, é necessário avaliar as variáveis propostas e remover aquelas que tenham um valor-p (probabilidade de significância) mais elevado.

Também foi estimada a significância dos coeficientes de regressão para determinar o potencial de cada fator no modelo de regressão. Considera-se a contribuição de um determinado fator significativa se o teste de hipóteses (teste t) do respetivo coeficiente de regressão rejeitar, com 95% de confiança, a hipótese nula. No entanto, este teste é parcial uma vez que o coeficiente de regressão desse fator é dependente de todos os outros fatores considerados no modelo. A inclusão desse fator deve-se à sua contribuição para a melhoria do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) ajustado do modelo RLM (Tabela 1).

Tabela 1. – Modelo de regressão linear múltipla (RLM) para deslocamentos

Ponto	R <sup>2</sup>	σ (mm)	x <sub>h</sub>	x <sub>T</sub>	x <sub>D</sub>	Ponto	R <sup>2</sup>	σ (mm)	x <sub>h</sub>	x <sub>T</sub>	x <sub>D</sub>
EEM	0,307	1,33	-	✓	-	EEJ	0,418	1,38	-	✓	×
1M	0,618	1,34	-	✓	×	1J	0,460	1,63	-	✓	×
2M	0,722	1,25	-	✓	✓	2J	0,635	1,48	-	✓	×
3M	0,800	1,18	×	✓	✓	3J	0,740	1,38	×	✓	✓
4M	0,899	0,92	×	✓	✓	4J	0,816	1,32	×	✓	✓
5M	0,941	0,83	×	✓	✓	5J	0,910	1,09	×	✓	✓
6M	0,941	0,70	✓	✓	✓	6J	0,912	0,93	×	✓	✓
7M	0,938	0,67	×	✓	✓	7J	0,912	0,85	×	✓	✓
8M	0,921	0,66	-	✓	✓	8J	0,883	0,89	-	✓	✓
EDM	0,799	0,52	-	✓	✓	EDJ	0,825	0,52	-	✓	✓

- fator não considerado; ✓ fator significativo; × fator não significativo.

Como resultado da análise de variância (ANOVA), o fator da cota da água da albufeira foi excluído dos modelos RLM para as cotas dos encontros e dos pilares mais curtos (P1, P2 e P8), o que é coerente, visto que esses encontros e pilares estão localizados nas margens da barragem. Revela-se ainda que este fator tem uma influência limitada mesmo para os pilares localizados dentro da albufeira.

Por outro lado, a temperatura do ar e o efeito do tempo são significantes para as variações de deslocamento observadas. Na maioria dos casos, a variação das variáveis consideradas conseguiu explicar acima de 80% da variação das cotas medidas, como mostraram os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) ajustados dos modelos obtidos. No entanto, os modelos são menos satisfatórios para o encontro esquerdo e o pilar P1, que, por sua vez, são locais mais distantes do ponto de referência utilizado (Figura 2) e estão associados aos intervalos de erro de observação maiores.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os coeficientes de regressão das variáveis propostas – ver equação (1) – indicam o contributo de cada variável (temperatura, cota da albufeira e o tempo) para o comportamento do modelo de regressão linear múltipla utilizado. Consequentemente, poderá inferir-se que corresponde à importância relativa da grandeza em causa para a evolução dos deslocamentos observados.

Assim, analisando os modelos RLM obtidos, pode-se observar que o coeficiente de regressão da temperatura (Figura 7) varia em função da altura do pilar. Esta relação é quase linear e corresponde à expansão térmica dos pilares.

A subida do nível de água na albufeira reduz o comprimento do troço emerso dos pilares, reduzindo, desta forma, o efeito da variação da temperatura do ar sobre os pilares (Figura 8).

Finalmente, o valor estimado da subida do topo dos pilares devido às reações expansivas varia entre 0,1 mm e 1,4 mm por ano, ocorrendo o valor mais elevado no pilar mais alto, o pilar P5 (Figura 9).

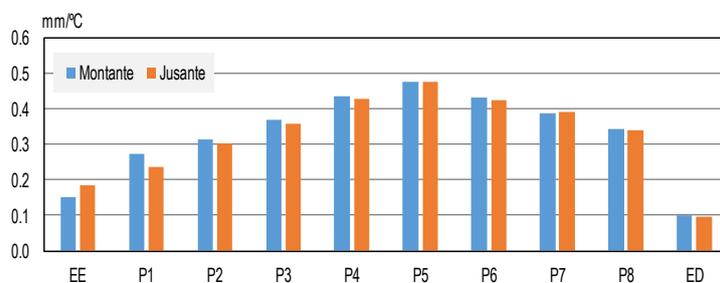


Figura 7. Coeficiente de regressão da temperatura

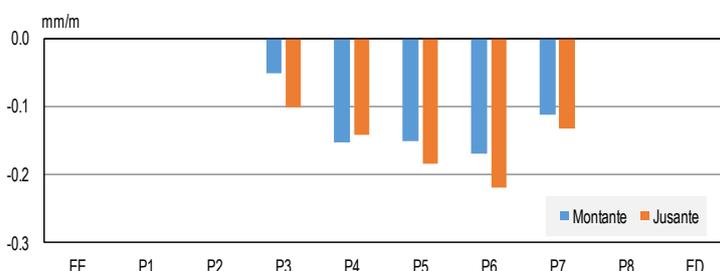


Figura 8. Coeficiente de regressão da cota da albufeira

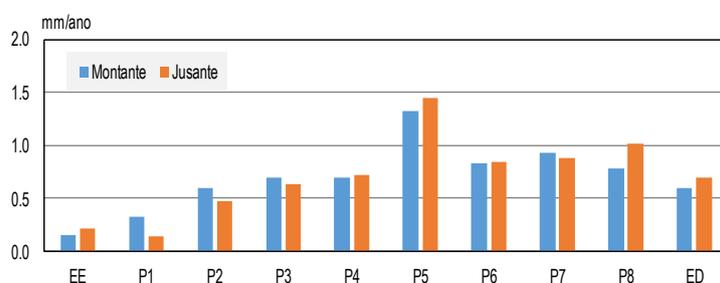


Figura 9. Coeficiente de regressão do tempo

Na Tabela 2 estão apresentados os intervalos de confiança dos modelos RLM com  $R^2$  superior a 0,8 e os desvios de previsão para as campanhas de 2017 e 2018. Verifica-se que, de um modo geral, os

desvios de previsão para os valores medidos durante a campanha de 2017 estão dentro do intervalo de confiança a 99%. No entanto, os desvios de previsão da campanha de 2018 são negativos e fora do intervalo de confiança. Ou seja, com 99% de probabilidade, os valores medidos em 2018 são inferiores aos esperados face à tendência dos anos anteriores.

Tabela 2. – Intervalo de confiança e desvios de previsão dos anos 2017 e 2018 (mm)

Ponto	Intervalo de confiança 99%	2017	2018	Ponto	Intervalo de confiança 99%	2017	2018
4M	±2,38	0,64	-2,39	4J	±3,41	1,43	-1,60
5M	±2,15	-0,59	-3,40	5J	±2,80	-2,52	-3,08
6M	±1,80	-0,38	-2,78	6J	±2,39	-1,51	-1,57
7M	±1,72	0,24	-2,45	7J	±2,20	-1,16	-2,49
8M	±1,71	-0,59	-2,31	8J	±2,28	-1,93	-2,40
6M	±1,80	-0,38	-2,78	6J	±2,39	-1,51	-1,57
6M	±1,80	-0,38	-2,78	6J	±2,39	-1,51	-1,57

Na Figura 10 apresenta-se a evolução das cotas dos pilares mais altos após a eliminação dos efeitos ambientais e operacionais. Os valores medidos estão representados na Figura 3. As linhas tracejadas representam a expansão dos pilares, estimada pelos modelos RLM. Como se pode verificar, ao fim de 9 anos, a subida de cota acumulada por efeito da reação expansiva ultrapassa os 4 mm, com o valor máximo de 8,8 mm no pilar P5, apesar da reversão verificada no final do ano 2018.

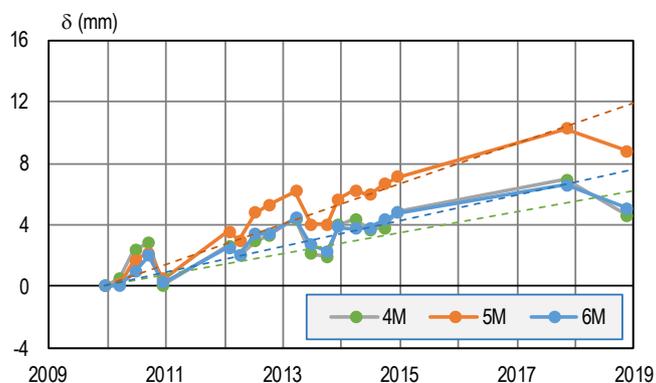


Figura 10. Deslocamentos no topo dos pilares P4 a P6 após a eliminação dos efeitos ambientais

## 6 EVOLUÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA ESTRUTURA

Como se referiu no início, entre 2011 e 2018 realizaram-se 7 ensaios de vibração ambiente, com objetivo de identificar eventuais alterações das características dinâmicas da estrutura ao longo do tempo. Considera-se que a alteração das características dinâmicas é resultado da evolução do estado de degradação da estrutura, sendo, no entanto, também condicionada pelas condições ambientais e operacionais, como a temperatura ambiente e a altura de água na albufeira [10].

Na Tabela 3 apresenta-se a evolução da frequência dos modos de vibração transversais da estrutura identificadas nos 7 ensaios, sendo este parâmetro mais sugestível à degradação dos pilares, afetados

pelos reações expansivas. Analogicamente, também se efetuou uma análise das frequências obtidas com método de regressão linear múltipla. Como regressores do modelo RLM foram considerados, além dos fatores mencionados anteriormente, o valor eficaz das acelerações ( $x_r$ ) como indicador dos níveis de vibração.

Tabela 3. – Evolução da frequência dos modos de vibração transversais

Modos	Abr-11	Mai-12	Nov-12	Mai-13	Dez-13	Nov-17	Nov-18
1º	0,65	0,65	0,67	0,65	0,67	0,68	0,68
2º	1,28	1,28	1,33	1,26	1,34	1,36	1,35
3º	1,95	1,93	2,04	1,91	2,05	2,12	2,03
4º	2,79	2,73	2,89	2,74	2,90	3,06	2,90
5º	3,12	3,10	3,24	3,11	3,33	3,33	3,32

Na Figura 11 estão representados os erros de estimação dos modelos RLM para as frequências identificadas nos anos de 2011 a 2017 e os respetivos desvios de padrão. No mesmo gráfico também se incluem os erros de previsão para os resultados dos ensaios realizados em 2018, obtidos com base nesses modelos RLM. Neste caso, os desvios de previsão são positivos e maiores que os intervalos de confiança a 99%, o que indicia que o estado da estrutura não se degradou neste último ano como previsto pelo modelo RLM.

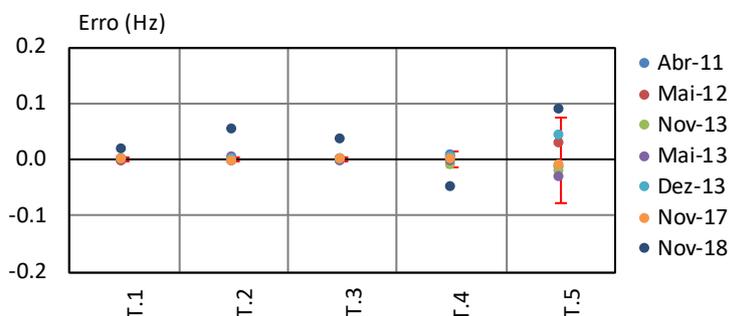


Figura 11. Erros de estimação e desvios de previsão dos modelos RLM

## 7 CONCLUSÕES

Entre 2009 e 2014 a Ponte antiga da Foz do Dão foram realizadas 17 campanhas de nivelamento geométrico com uma periodicidade trimestral. Após a desativação da ponte, em agosto de 2015, realizaram-se mais duas campanhas de nivelamento, em novembro de 2017 e 2018.

Os resultados dos nivelamentos revelam o efeito da sazonalidade na variação das cotas medidas, com valores mais elevados no verão ou no outono. No entanto, foi verificada uma tendência de incremento da cota do tabuleiro sobre os pilares ao longo do tempo.

Recorrendo a uma análise estatística de regressão linear múltipla foi possível separar os efeitos ambientais e operacionais do processo de degradação dos pilares ao longo do tempo. Estimou-se que ao fim de 9 anos de observação, a expansão acumulada dos pilares mais altos e, conseqüentemente,

com maiores troços submersos, foi superior a 4 mm. A análise estatística dos resultados permitiu, ainda, identificar a tendência de estabilização dos efeitos da reação expansiva a partir do ano 2018, o que é compatível com os resultados dos ensaios dinâmicos.

Desta forma, o modelo de regressão linear múltipla utilizado mostrou a sua adequação na análise do comportamento da estrutura, monitorizado num período prolongado, que permitiu estabelecer relações lineares entre, por um lado, efeitos de tempo e as condições ambientais, designadamente a temperatura e o nível da água da albufeira, por outro lado, a resposta estrutural.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Infraestruturas de Portugal a possibilidade de apresentar este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Rodrigues, T.; Pereira, A. R.; Costa, A. M. (2021). Reinforcement and replacement interventions in some bridges located on Aguieira dam road network. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol. I, p 1669-1681, April 2021.
- [2] Armando Rito Engenharia (2015). IP3 – Ponte sobre a Foz do Rio Dão. Substituição da Obra de Arte. Projeto Variante. Projeto de Execução.
- [3] Santos, L. Oliveira; Xu, Min; Vieira, Tiago (2017). Thermal behaviour of a concrete cable-stayed bridge in Algeria. 39<sup>th</sup> IABSE Symposium – Engineering the Future. September 21-23 2017, Vancouver, Canada.
- [4] TRIEDE (2009). IP3 - Ponte sobre a Foz do Dão. Reabilitação do embasamento do pilar P1. Projeto de execução.
- [5] PROFICO (2010). IP3 - Ponte sobre a Foz do Rio Dão. Reforço do fuste do pilar P2. Projeto de execução. Memória descritiva e justificativa.
- [6] LNEC (2018). Ponte Desativada na Foz do rio Dão: resultados do nivelamento geométrico efetuado em novembro de 2018. Nota Técnica 155/2018 – DBB/NGA.
- [7] Henriques, M. J.; Oliveira, S.; Lima, N. (2013). Long-term geodetic displacements. Evaluating the quality of measured displacements. FIG Working Week 2013. Environment for sustainability. Abuja, Nigeria, 6 -10 May 2013.
- [8] LNEC (2012). Avaliação do estado de degradação do betão da Ponte sobre a Foz do Rio Dão.
- [9] Gomes, J. P.; Batista, A. L.; Oliveira, S. (2009). Damage-Chemo-Viscoelastic Model on the Analysis of Concrete Dams under Swelling Processes. Long Term Behaviour of Dams - LTBD09, 12-13 Oct. 2009, Graz, Austria.
- [10] LNEC (2016). Ensaio de diagnóstico da reatividade álcalis-agregado do betão da Ponte sobre a Foz do Rio Dão. Relatório final.
- [11] Xu, Min; Santos, Teresa (2016). Avaliação da condição estrutural baseada nos ensaios de medições de vibrações ambiente. II<sup>o</sup> Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão.