

Ensaio dinâmico ambiente para avaliação dos danos na Ponte Antiga da Foz do Dão



Xu Min¹



L. Oliveira Santos²



Manuel Pipa³

RESUMO

As características dinâmicas de uma estrutura refletem o seu comportamento global, pelo que alterações dos parâmetros modais podem indicar eventuais alterações da rigidez da estrutura e das suas condições de fronteira. Neste sentido tem-se vindo a desenvolver a técnica de deteção de dano através de ensaios de caracterização dinâmica ambientais, realizados *in situ* sem restrições ao funcionamento das obras.

Nesta comunicação apresenta-se a aplicação dessa técnica de ensaios na ponte antiga de Foz do Dão, atualmente desativada. A ponte apresenta danos evidentes nos seus elementos estruturais, em parte resultantes de reações expansivas no betão. Foram efetuados ensaios de caracterização dinâmica durante os últimos anos, permitindo um acompanhamento da evolução do seu estado de conservação geral e dos efeitos desses danos no comportamento estrutural global. Na análise da evolução das características dinâmicas tiveram-se em consideração os efeitos das condições ambientais e operacionais.

Palavras-chave: Caracterização dinâmica / Avaliação de danos / Reações expansivas do betão / Efeitos ambientais

1. INTRODUÇÃO

As características modais duma estrutura dependem da sua rigidez global e local, bem como das suas condições de fronteira, motivando a sua determinação experimental, em particular, as frequências naturais, como forma de avaliar as características estruturais globais e locais [1]. A monitorização da evolução das características modais ao longo do tempo permite, em princípio, detetar danos estruturais, através da deteção de alterações desses parâmetros modais, em particular das frequências naturais. No entanto, as condições ambientais e operacionais também afetam as características dinâmicas estruturais, tornando necessária a separação de efeitos para possibilitar a deteção duma possível degradação.

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa, Portugal. xumin@lnec.pt

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa, Portugal. luisosantos@lnec.pt

³Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa, Portugal. mpipa@lnec.pt

As reações expansivas de origem interna no betão são uma causa emergente de degradação de pontes em Portugal. Sejam reações sulfáticas internas ou reações alcális-agregado, a expansão do betão afetado por estas reações causa, geralmente, a sua fissuração e a diminuição das suas propriedades mecânicas, designadamente a rigidez e a resistência [2]. Embora este processo expansivo já seja bem conhecido, em particular através de numerosos testes laboratoriais, permanece alguma falta de conhecimento sobre a sua progressão nas estruturas afetadas, o que motiva o desenvolvimento de técnicas eficientes para monitorizar os efeitos estruturais dessas reações.

A ponte antiga da Foz do rio Dão, no IP 3, apresenta deficiências estruturais decorrentes da existência de reações expansivas internas do betão, de que resulta uma fendilhação visível nos seus pilares. As dificuldades e os custos da reparação motivaram a sua substituição. A nova ponte foi inaugurada em agosto de 2015, tendo a ponte em estudo permanecido interdita ao tráfego desde então. As preocupações com a segurança da ponte motivaram a realização, desde 2011, de seis ensaios de caracterização dinâmica da ponte com objetivo de detetar eventuais alterações das características dinâmicas da estrutura, designadamente das frequências e configurações dos seus principais modos naturais de vibração.

Após uma breve descrição da estrutura da ponte e dos danos identificados em inspeções visuais, neste trabalho descrevem-se os ensaios de vibração ambiente realizados ao longo de sete anos, bem como o procedimento adotado, e apresentam-se os resultados obtidos, que se relacionam com a evolução do estado da ponte.

2. DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE

A antiga Ponte da Foz do Dão foi projetada pelo Prof. Edgar Cardoso e foi construída nos anos 70 do século passado, inserindo-se na rede viária da Barragem da Aguieira. É uma estrutura em betão armado pré-esforçado, com um comprimento total de 340 m, constituída por nove tramos, com dois tramos de extremidade de 30 m e sete tramos intermédios de 40 m (Fig.1).



Figura 1. Vista geral da ponte (alçada montante).

O tabuleiro é em laje vigada de largura de 15.20 m, composta por 4 vigas longitudinais, afastadas entre si de 4.00 m, e por carlingas colocadas a meio vão no caso dos tramos extremos, ou a terços vãos no caso dos tramos intermédios e nas secções de apoio. As vigas longitudinais têm uma altura que varia entre 2.00 m, nas secções de meio vão, e 2.50 m, sobre os apoios nos pilares.

Os oito pilares, cuja altura dos pilares varia entre 20 m e 85 m, são constituídos por um fuste único de secção oca em forma de losango. As fundações são diretas, materializadas por meio de sapatas. Como se pode observar na Fig.2, apenas o troço superior dos pilares, com uma extensão de 15 m, permanece acima da cota máxima da albufeira.

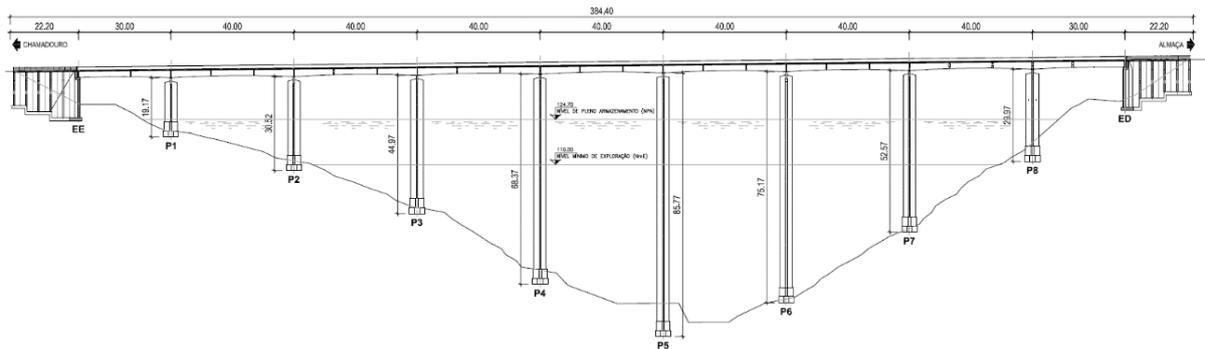


Figura 2. Alçado da ponte.

Os apoios do tabuleiro sobre os pilares P1 e P2 e no encontro EE são móveis, realizados por blocos de teflon. Nos restantes pilares e no encontro ED os apoios são fixos, realizados por meio de chapas de chumbo com ferrolhos.

Esta ponte foi objeto de diversas inspeções visuais, incluindo inspeções subaquáticas, que permitiram detetar diversas 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 (Fig.3), em especial nas zonas localizadas a maior profundidade, que foram associadas à existência de reações expansivas no betão.



Figura 3. Danos nos elementos estruturais.

3. CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA EXPERIMENTAL

3.1 Ensaios de vibração ambiental

Os ensaios de vibração ambiental, usualmente induzida pela ação do vento ou do tráfego, têm, em geral, como objetivo a identificação das frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos principais modos de vibração globais da estrutura.

Em abril de 2011 foram realizados os primeiros ensaios de identificação das características dinâmicas da ponte [3], tendo como objetivo obter informação que permitisse a caracterização do estado da obra, e que servisse de referência para o seu acompanhamento futuro. Este ensaio permitiu, também, a calibração do modelo numérico a utilizar na análise da estrutura. Em 9 *setups* foram medidas acelerações verticais em 70 pontos e acelerações transversais em 39 pontos, localizados ao longo do tabuleiro (Fig.4).

Tendo em vista despistar eventuais alterações das características dinâmicas da estrutura, nos dois anos seguintes foram realizados ensaios de medição de vibração ambiental com periodicidade semestral. As

medições de acelerações foram efetuadas em apenas 13 pontos, localizados no lado de montante dos três tramos centrais. O último teste foi realizado após a ponte ser desativada, em novembro de 2017, tendo sido medidas acelerações em 28 pontos, incluindo alguns pontos no lado de jusante.

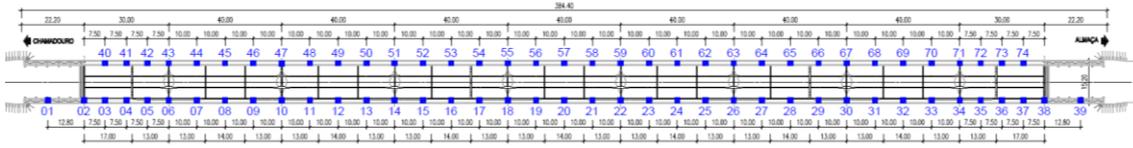


Figura 4. Pontos de medição de aceleração.

A aquisição de acelerações em todos os ensaios foi efetuada com uma frequência de amostragem de 500 Hz, com registos de cerca de 35 minutos de duração por *setup*. Os acelerómetros foram configurados para uma sensibilidade de 20 Volt/g, com fator de ganho de 5, obtendo assim uma amplitude mínima de aceleração de 0,381 μ g.

3.2 Condições ambientais e operacionais

Os ensaios foram executados nas épocas de primavera (abril/maio) e de outono (novembro/dezembro), para ter em conta a sazonalidade das condições ambientais, nomeadamente, a cota da albufeira e a temperatura do ar (Fig.5). O nível da albufeira em novembro de 2017 foi o mais baixo, devido à seca severa que ocorreu em Portugal nesse período. A temperatura do ar no outono foi menor do que na primavera, com uma diferença de cerca de 15°C.

A intensidade do tráfego rodoviário e o vento provocam respostas dinâmicas da estrutura com maior ou menor amplitude, que são refletidas nos níveis de vibração da estrutura. Assim, os valores médios efetivos ou quadráticos (RMS) das acelerações podem ser um indicador da intensidade da ação (Fig.6). De facto, no primeiro teste foram registados valores RMS das acelerações mais altos porque o ensaio foi realizado sem nenhuma restrição de tráfego. Posteriormente, dadas as anomalias que a ponte apresentava, foram impostos limites de velocidade na ponte, bem como a proibição de passagem dos veículos pesados. O ensaio de novembro de 2017 foi realizado após a ponte ter sido desativada. As condições ambientais e operacionais durante cada ensaio estão resumidas no Quadro 1.

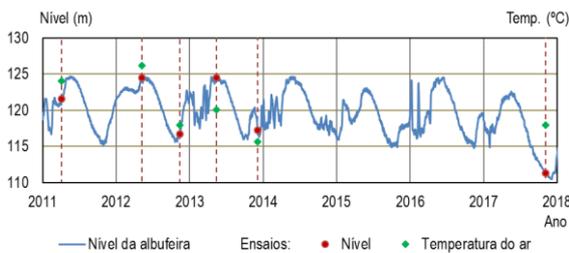


Figura 5. Nível da albufeira e temperatura do ar

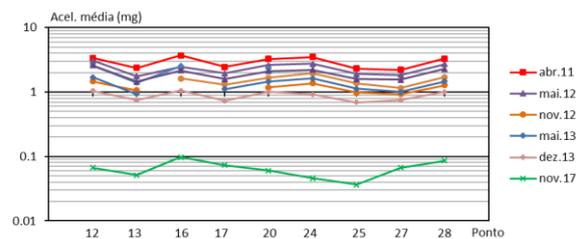


Figura 6. RMS da aceleração vertical

Quadro 1. Condições ambientais e operacionais.

Ensaio	2011.04.06	2012.05.10	2012.11.13	2013.05.14	2013.12.06	2017.11.09
D (dias)	0	400	587	769	975	2409
L (m)	121.6	124.5	116.7	124.5	117.2	111.3
T (°C)	28.0	32.3	15.8	20.1	11.2	15.2
RMS_V (mg)	3.270	1.423	2.375	1.887	1.008	0.289
RMS_T (mg)	0.404	0.149	0.268	0.180	0.102	0.027

L – nível da água da albufeira; T – temperatura do ar; RMS_V – RMS da aceleração vertical registada no ponto 20, pré-processada; RMS_T – RMA da aceleração transversal registada no ponto 22, pré-processada

3.3 Identificação das características dinâmicas

Antes do processo de identificação modal, todos os registos de aceleração obtidos nos ensaios foram objeto de um pré-processamento constituído por filtragem e decimação. A identificação modal subsequente foi apenas desenvolvida até à frequência de 10 Hz.

A análise dos registos de aceleração adquiridos foi efetuada com o programa *ARTEMIS Extractor* [4] que consiste na aplicação do método aperfeiçoado de decomposição no domínio da frequência (método EFDD) baseado, fundamentalmente, na decomposição em valores singulares da matriz de funções de densidade espectral das acelerações medidas nos ensaios.

As frequências (f) e coeficientes de amortecimento (ξ) associados aos modos de vibração identificados com base nos registos dos seis ensaios são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2. Características dinâmicas da estrutura identificadas.

Modo	2011.04.06		2012.05.10		2012.11.13		2013.05.14		2013.12.06		2017.11.09	
	f (Hz)	ξ (%)										
1º transv.	0.647	1.9	0.648	1.9	0.669	1.7	0.646	1.6	0.671	1.5	0.683	1.4
2º transv.	1.276	1.9	1.277	1.5	1.332	1.7	1.264	1.4	1.341	1.6	1.365	1.3
3º transv.	1.950	1.3	1.929	1.3	2.036	1.3	1.909	2.2	2.046	1.5	2.116	0.9
4º transv.	2.790	0.3	2.734	1.0	2.886	0.8	2.741	0.9	2.897	0.9	3.057	1.1
5º transv.	3.117	1.3	3.097	0.8	3.243	1.0	3.105	3.5	3.326	0.9	3.327	1.0
1º vert.	1.801	3.1	1.738	2.7	1.890	1.5	1.790	2.1	1.908	2.3	1.954	0.9
2º vert.	2.059	1.4	1.994	2.5	2.151	1.5	2.077	2.2	2.181	2.1	2.204	1.3
1º torção	2.240	1.2	2.168	1.7	2.312	0.5	2.209	1.8	2.384	2.0	2.408	1.3
2º torção	2.516	0.4	2.415	0.4	2.582	0.4	2.500	2.0	2.657	1.0	2.656	0.8
3º vert.	3.334	0.9	3.264	1.0	3.435	0.9	3.363	1.8	3.526	1.7	3.594	1.0
4º vert.	3.801	1.0	3.731	0.9	3.966	0.3	3.814	1.3	3.989	1.3	4.043	0.8
5º vert.	4.123	0.3	4.083	0.2	4.727	0.6	4.142	0.6	4.771	1.0	4.400	1.0
6º vert.	5.108	0.6	5.045	0.4	5.312	0.6	5.171	0.6	5.283	1.4	5.678	0.5
7º vert.	7.202	1.2	6.917	0.7	7.245	0.8	7.020	0.4	7.356	0.6	7.684	0.4

As configurações dos primeiros três modos transversais, dos dois primeiros modos verticais e do primeiro modo de torção, estão representadas na Fig.7. Em traço contínuo estão representadas as configurações identificadas no ensaio inicial, enquanto os pontos assinalam as configurações obtidas nos cinco ensaios posteriores.

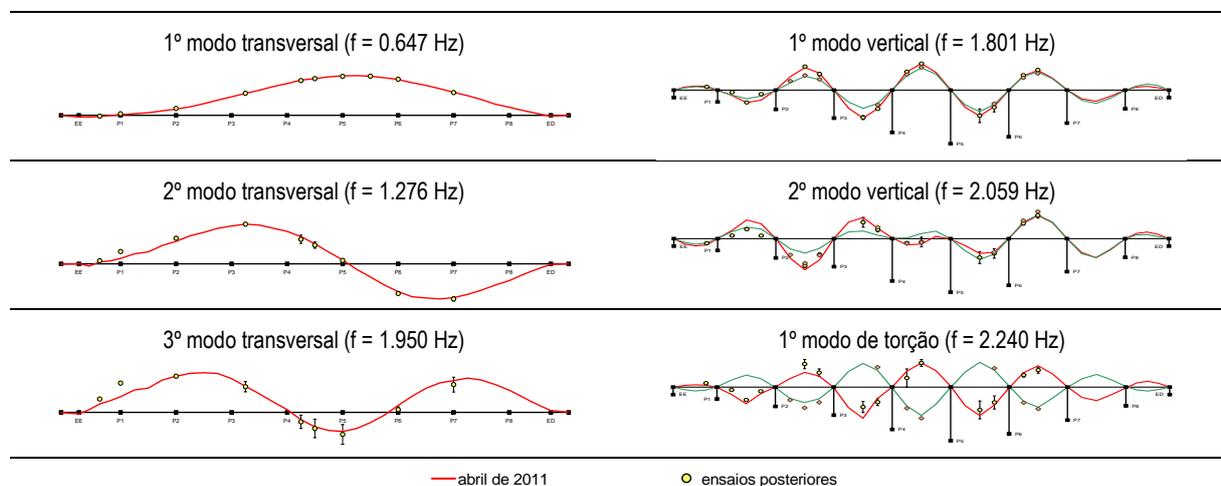


Figura 7. Configuração modal dos modos identificados.

4. AVALIAÇÃO DO ESTADO DA OBRA DE ARTE

4.1 Evolução das características dinâmicas

A comparação das frequências naturais da ponte, obtida nos seis ensaios realizados, é demonstrada na Fig.8. Verifica-se que, ao longo do tempo, as frequências sofreram flutuações sazonais que são relacionadas com a variação das condições ambientais e operacionais, tais como a temperatura ambiente e o nível da água da albufeira.

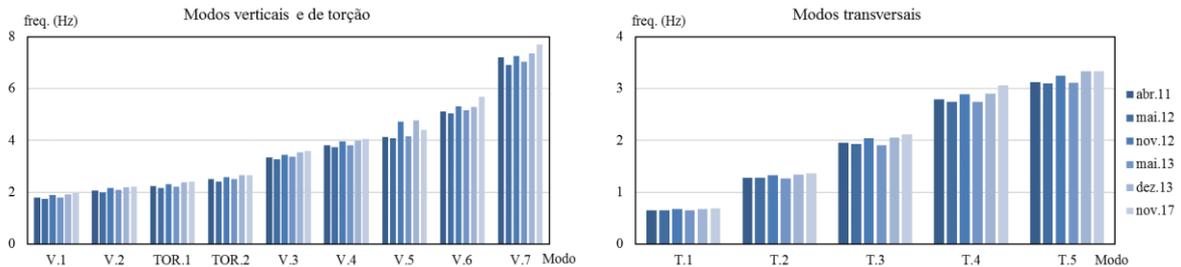


Figura 8. Frequências naturais identificadas.

De acordo com alguns estudos [5][6][7], a variação da temperatura ambiente pode induzir alterações na deformabilidade dos materiais de construção da via rodoviária, tais como o betuminoso e o betão estrutural. Se a temperatura baixar de 25°C para 15°C, o módulo de deformabilidade do betuminoso pode aumentar em 50% e o módulo de elasticidade do betão aos 28 dias aumenta cerca de 3%. Além disso, as variações de temperatura e humidade introduzem alterações nas condições de fronteira, afetando o funcionamento das juntas de dilatação e dos aparelhos de apoio da estrutura [8].

Por outro lado, admitindo que a massa de água no interior dos pilares vibra conjuntamente com os pilares, a variação do nível da água da albufeira provocará a alteração das características dinâmicas da ponte, sendo que, quando o nível da água aumenta, as frequências naturais descem.

Finalmente, o nível de vibração induzida pelas passagens de veículos e o vento pode ter um impacto nos elementos estruturais fendilhados, modificando a rigidez e respostas dinâmicas desses elementos [9].

Assim sendo, a deteção de quaisquer alterações da estrutura monitorizada só é possível após a eliminação ou redução dos efeitos dos fatores externos, ambientais e operacionais, na variação dos parâmetros modais analisados.

Neste estudo, recorreu-se à técnica de Regressão Linear Múltipla (RLM) com o objetivo de clarificar as relações entre as possíveis fontes de influência e as variações de frequência natural identificadas. Para o efeito, foi considerado como fator ambiente o valor médio da temperatura do ar medida durante cada ensaio. Como fatores operacionais foram considerados o nível da água da albufeira e os valores RMS da aceleração vertical e transversal. Por fim, a possível progressão da degradação da estrutura foi assumida em função linear do tempo (dias).

Assumindo que as frequências identificadas experimentalmente são afetadas pelas ações ambientais e operacionais, bem como pela progressão da degradação, a relação entre a frequência identificada (variável y) e as ações externas (ambiente e tráfego) e internas (degradação) pode ser formulada pela seguinte expressão:

$$y = A_0 + A_1T + A_2L + A_3R + A_4D + \varepsilon \quad (1)$$

onde T - Temperatura do ar; L - nível de água da albufeira; R - RMS da aceleração pré-processada; D - Tempo (dias) passado desde o 1º teste; ε - valor remanescente.

Devido à forte correlação entre os valores RMS das acelerações adquiridas simultaneamente, no modelo RLM foi considerado apenas um dos valores RMS de aceleração: para os modos transversais foi utilizado o RMS da aceleração transversal medida no ponto 22; para os modos vertical e de torção recorreu-se ao RMS da aceleração vertical no ponto 20.

Se o modelo RLM for adequado, as diferenças ε entre as frequências identificadas e estimadas devem ser valores aleatórios com distribuição normal. No entanto, devido à pequena dimensão da amostra dos ensaios realizados, a utilização do método estatístico de análise de regressão teve algumas limitações: para que o modelo RLM proposto fosse estatisticamente significativo, ou seja, a significância F da regressão do modelo (teste F) ser inferior a 0.05, foi necessário avaliar as variáveis propostas e remover aquelas com um valor- p (probabilidade de significância) mais elevado.

Os modelos RLM para as variações de frequências naturais são apresentados no Quadro 3. Na generalidade, o conjunto dos fatores considerados explicou mais de 90% das variações de frequência, exceto no 5º modo vertical, em que não se obteve modelo RLM com a significância F pretendida.

Quadro 3. Modelos RLM e significância dos fatores.

Modo	f _{ref.} (Hz)	R ² ajustado	Fatores			
			Temperatura do ar (T)	Nível de água (L)	Aceleração (R)	Tempo (D)
1º transversal	0.647	0.993	—	√	×	×
2º transversal	1.276	0.998	—	√	√	√
3º transversal.	1.950	1.000	—	√	√	√
4º transversal	2.790	0.998	—	√	—	√
5º transversal	3.117	0.927	×	×	—	—
1º vertical	1.801	0.998	√	√	×	—
2º vertical	2.059	0.994	√	√	×	—
1º de torção	2.240	0.955	×	√	—	—
2º de torção	2.516	0.943	×	×	—	—
3º vertical	3.334	0.976	×	×	—	×
4º vertical	3.801	1.000	√	√	—	—
5º vertical	4.123	—	—	—	—	—
6º vertical	5.108	0.977	—	√	—	√
7º vertical	7.202	0.928	—	√	—	×

— fator não considerado; √ fator significativo; × fator não significativo;

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.

Como esperado, o nível da albufera tem um impacto significativo na frequência de quase todos os modos identificados, tendo-se verificado que por cada metro da subida do nível, as frequências baixam entre 0.003 Hz e 0.044 Hz. As alterações da temperatura ambiente têm uma influência relativamente modesta e apenas nos primeiros modos verticais, sem efeitos significativos nos modos transversais. A amplitude de vibração da estrutura tem algum impacto na frequência dos primeiros modos transversais e verticais, mais significativo nos modos transversais.

Com base nos modelos RLM acima referidos foram estimadas as frequências naturais ao longo do tempo, excluindo as parcelas devidas às alterações das condições ambientais e operacionais, e considerando como referência as características dinâmicas obtidas nos ensaios realizados em abril de 2011, cuja evolução está representada na Fig.9.

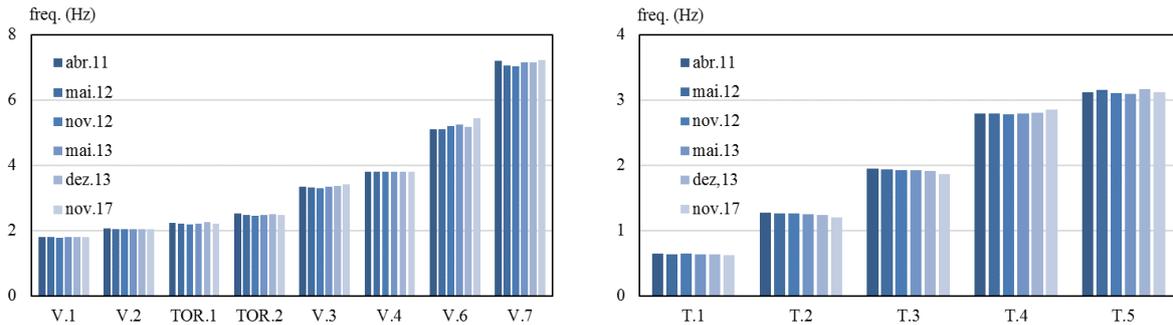


Figura 9. Evolução de frequências naturais ajustadas (após eliminação dos efeitos das condições ambientais e operacionais).

Observa-se que as frequências dos modos verticais e de torção tiveram uma pequena flutuação, de cerca de 2%, enquanto as frequências dos modos transversais têm uma tendência decrescente. Destaca-se a descida da frequência do 2º modo transversal, de cerca de 6% ao fim de 7 anos.

Como se pode verificar, o efeito do tempo foi notório nos primeiros modos transversais, o que se deve, provavelmente ao facto da degradação do betão desta ponte estar associada essencialmente à existência de reações expansivas internas do betão, nomeadamente nos troços submersos dos pilares. Os modos verticais e de torção são mais afetados pelo tabuleiro que não está degradado da mesma forma.

4.2 Evolução da rigidez da estrutura

A modelação numérica da estrutura com vários cenários de dano pode ajudar a explicar, de uma forma mais precisa, as origens da variação das características dinâmicas identificadas experimentalmente. No entanto, o processo exigiria o desenvolvimento de modelos não-lineares muito complexos e a admissão de um conjunto variado de hipóteses.

Neste estudo, os ensaios foram realizados com objetivo de avaliar a evolução da rigidez global da ponte e, conseqüentemente, a sua segurança. A aquisição de vibração foi efetuada em pontos distribuídos no tabuleiro, numa malha pouco densa. Desta forma, foram identificados essencialmente modos de vibração do tabuleiro.

Assim sendo, para averiguar a alteração da rigidez da estrutura, nomeadamente a degradação que possa estar na origem da alteração das características dinâmicas da estrutura, foi utilizado um modelo numérico de elementos finitos, desenvolvido com o programa SAP2000 [3].

A definição do modelo de elementos finitos foi efetuada com base nas características geométricas de projeto e considerando também as obras de reabilitação realizadas antes dos ensaios (Fig.10). A deformabilidade do solo de fundação foi simulada através de apoios elásticos distribuídos por unidade de área. Dado que na zona submersa dos pilares existe água no seu interior, a qual influencia as características dinâmicas da ponte, no modelo numérico foi considerada a correspondente massa de água, admitindo que essa massa vibra em conjunto com os pilares [3].

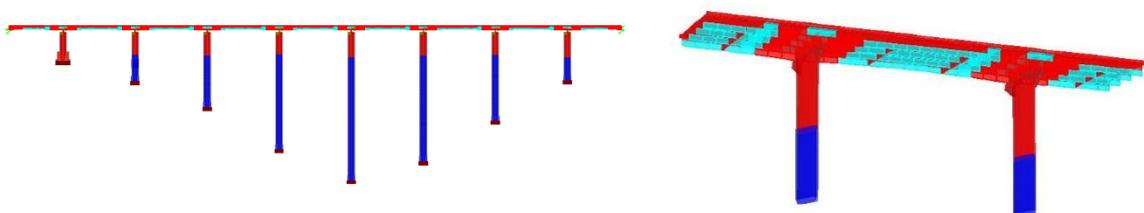


Figura 10. Modelo de elementos finitos

O modelo de cálculo considera quatro tipos de betão para vários tipos de elementos estruturais, de modo a distinguir elementos sãos e com dano:

- sapatas de fundação dos pilares (castanho);
- troços submersos dos pilares (azul);
- troços emersos e capitéis dos pilares e tabuleiro nas zonas de betão são (vermelho);
- zonas do tabuleiro com danos no betão (azul claro).

Os danos existentes no tabuleiro e nos pilares da ponte foram simulados numa forma simplificada, através da diminuição do módulo de elasticidade de betão na zona afetada ou da diminuição da inércia dos elementos.

O modelo foi calibrado com base nos resultados dos ensaios dinâmicos de abril de 2011 e serviu como referência para a interpretação dos resultados dos ensaios posteriores.

A análise de sensibilidade mostra que a rigidez do tabuleiro é um dos principais fatores que determinam as características dinâmicas da estrutura em geral, enquanto a rigidez dos pilares tem efeito mais significativo nos modos transversais. Uma vez que as frequências ajustadas dos principais modos verticais e de torção não sofreram variação significativa ao longo do tempo (menos de 2%), considera-se que o estado do tabuleiro não teve alteração significativa neste período. No entanto, a descida das frequências dos modos transversais pode-se relacionar com a deterioração dos troços submersos dos pilares, como se referiu anteriormente.

De facto, introduzindo uma diminuição da rigidez de flexão dos troços degradados dos pilares em 20% na direção longitudinal (EI_{22}) e 10% na direção transversal (EI_{33}), as diferenças entre as frequências calculadas com o modelo atualizado e o modelo de referência estão mais próximas das diferenças entre as frequências identificadas em novembro de 2017 (frequências ajustadas) e em abril de 2011 (Fig.11).

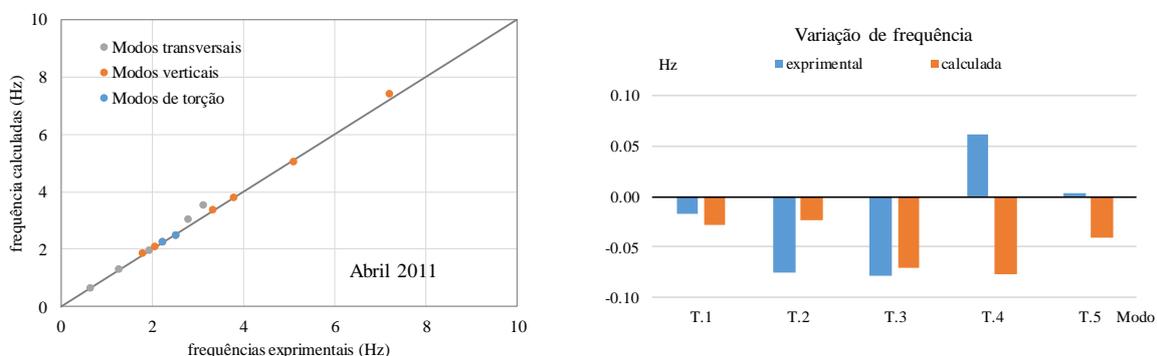


Figura 11. Frequências experimentais e calculadas

5. CONCLUSÕES

A ponte antiga sobre a Foz do rio Dão apresenta um significativo estado de degradação, causado fundamentalmente por reações expansivas internas em betão. Desde abril de 2011 a ponte foi objeto de campanhas periódicas de observação.

Os ensaios realizados ao longo do tempo tiveram como objetivo detetar as eventuais alterações das características dinâmicas da estrutura, nomeadamente, as frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos seus principais modos naturais de vibração, tendo como referência os parâmetros obtidos experimentalmente nos ensaios realizados em abril de 2011.

A análise dos resultados experimentais permite concluir que a variação das características dinâmicas identificadas nos diferentes ensaios foi essencialmente condicionada pelas condições ambientais e

operacionais, tais como a temperatura ambiente e o vento, a altura de água na albufera e a intensidade de tráfego. A aplicação dos modelos de Regressão Linear Múltipla possibilitou remover a influência das condições ambientais e operacionais e, conseqüentemente, obter a evolução das frequências naturais ao longo do tempo. Desta forma foi detetada uma tendência de redução das frequências dos primeiros modos transversais no período em análise.

A simulação numérica com base num modelo de elementos finitos elaborado e calibrado com os resultados dos ensaios realizados em abril de 2011 indicou uma progressão de degradação nos troços submersos dos pilares, severamente afetados por reações expansivas do betão.

Por fim, tendo em consideração a significativa influência das condições ambientais e operacionais nas características dinâmicas da estrutura, a eficácia da avaliação da evolução do estado da estrutura com base na realização de ensaios dinâmicos ambientais cresce com o aumento do número de ensaios realizados, preferencialmente em diferentes condições ambientais e operacionais.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- [1] Martin, R. P.; Metallsi, O. O.; Toutlemonde, F. (2012). Modelling of concrete structures affected by internal swelling reactions: couplings between transfer properties, alkali leaching and expansion. 2nd International conference on microstructure related durability of cementitious composites, Apr. 2012, France. 8 p, 2012.
- [2] Reynders, E.; Wursten, G.; De Roeck, G. (2014). Output-only structural health monitoring in changing environmental conditions by means of nonlinear system identification. Structural Health Monitoring 2014, Vol 13(1) 82–93, DOI: 10.1177/1475921713502836.
- [3] Rodrigues, J., Ledesma, M. (2012). Ensaios Dinâmicos para Avaliação da Condição Estrutural de uma Ponte. V Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro. 6 a 8 de junho de 2012.
- [4] Structural Vibration Solutions (SVS). (2005). ARTeMIS Extractor Handy, Release 3.5, Denmark.
- [5] Peeters B.; Maeck J.; and De Roeck G. (2001). Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects. Smart Materials and Structures, 10(3): 518-527.
- [6] Antunes, M. L. (1993). Avaliação da Capacidade de Pavimentos Utilizando Ensaios Dinâmicos. Tese de doutoramento. IST/UTL, Portugal.
- [7] Shoukry, Samir N.; William, Gergis W.; Downie, Brian; Riad, Mourad Y. (2011). Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials 25 (2011) 688–696
- [8] Sohn, H. (2007) Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. Philos. Trans. R. Soc. 28 (2007) 539–560. DOI: 10.1098/rsta.2006.1935
- [9] Waheed S.; Mostafa N.; Jawad D. (2011). Nonlinear Dynamic Characteristics of a Simple Blade with Breathing Crack Using Ansys Software. World Journal of Mechanics, Vol. 1 No. 2, 2011, pp. 21-30. doi: 10.4236/wjm.2011.12004.