



CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL DE MODELOS NUMÉRICOS DE PONTES FERROVIÁRIAS EM ALVENARIA DE PEDRA

Diogo Ribeiro¹

Pedro Jorge²

Cristina Costa³

Rúben Silva²

António Arêde²

Rui Calçada²

drr@isep.ipp.pt, pfmjorge@fe.up.pt, c.costa.pt@ipt.pt,

rubensilva@fe.up.pt, aarede@fe.up.pt, ruiabc@fe.up.pt.

¹CONSTRUCT-LESE, Instituto Superior de Engenharia, Politécnico do Porto

²CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

³CONSTRUCT-LESE, Instituto Politécnico de Tomar

Resumo. *O presente artigo descreve a calibração experimental dos modelos numéricos de duas pontes ferroviárias em alvenaria de pedra localizadas na rede ferroviária Portuguesa, a ponte do Côa e a ponte de Durrães. Os modelos numéricos tridimensionais desenvolvidos baseiam-se no método dos elementos finitos, com uma representação realística dos componentes estruturais das pontes e dos respetivos materiais. Os ensaios dinâmicos envolveram a realização de ensaios de vibração ambiental, tendo em vista a caracterização dos parâmetros modais, em particular, as frequências, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento. A metodologia de calibração automática baseou-se na utilização de um algoritmo genético que permitiu estimar e atualizar os parâmetros do modelo numérico, particularmente as propriedades elásticas de materiais. Os resultados da calibração evidenciaram uma muito boa concordância entre as respostas modais numéricas e experimentais e uma melhoria significativa em relação aos modelos numéricos antes da calibração.*

Palavras-chave: *pontes ferroviárias, alvenaria de pedra, modelação numérica, ensaios dinâmicos, calibração, algoritmo genético*

1 INTRODUÇÃO

O elevado número de pontes em arcos de alvenaria de pedra em funcionamento na rede ferroviária Europeia justifica a necessidade de implementação de planos de exploração adequados que permitam assegurar as adequadas condições de segurança. Ao longo das últimas décadas esta necessidade tem vindo a ser cada vez mais premente, sobretudo devido à tendência do aumento das cargas e das velocidades de circulação do tráfego. Além disso, a longevidade, robustez e os reduzidos custos de manutenção que são associados a estas pontes permitem considerá-las bons exemplos de sustentabilidade que importa preservar. Em Portugal existem cerca de 11750 pontes desta tipologia que representam cerca de 90% do total das pontes ferroviárias. Acresce que 70% destas pontes têm idades compreendidas entre 100 e 150 anos e apresentam vãos tipicamente inferiores a 5 m (Orbán, 2007).

Por constituírem estruturas com vários anos, a caracterização do estado de conservação destas pontes é essencial para avaliação do seu comportamento estrutural e da identificação dos limites de exploração das redes ferroviárias futuras. Para este objetivo, são geralmente efetuadas campanhas experimentais nas pontes envolvendo normalmente ensaios não destrutivos e que possibilitam a caracterização das características mecânicas dos materiais, em particular da alvenaria, das juntas e dos enchimentos, além de ensaios dinâmicos que permitem estimar os parâmetros modais globais, em particular as frequências naturais e os modos de vibração (Costa et al., 2015; Arêde et al., 2007; Costa et al., 2004; McCann e Forde, 2001).

Por outro lado, a avaliação do comportamento estrutural das pontes em arco de alvenaria requer em muitas situações o desenvolvimento de modelos numéricos geralmente baseados no método dos elementos finitos (Fanning et al., 2000) ou no método dos elementos discretos (Chetouane et al., 2005). As abordagens mais simplistas envolvem modelos numéricos bidimensionais, com elementos finitos planos e recorrendo à homogeneização das características dos diversos materiais. Os modelos numéricos mais avançados, são tridimensionais, recorrem tipicamente a elementos finitos de volume com a separação dos diversos materiais, e em algumas situações podem incluir o comportamento não linear dos materiais (Domede et al., 2013), e a interação entre os arcos e os respetivos enchimentos, ou mesmo entre os blocos de alvenaria, por intermédio de elementos de junta atríticos (Costa et al., 2011).

Neste artigo apresenta-se a modelação tridimensional de duas pontes ferroviárias em arco de alvenaria de pedra da rede ferroviária Portuguesa, as pontes do Côa e de Durrães. Os modelos numéricos desenvolvidos no programa ANSYS são de elevada complexidade e têm a particularidade de ter os vários constituintes da ponte individualizados, permitindo atribuir parâmetros materiais a cada um deles. Estes parâmetros foram obtidos a partir dos resultados de campanhas experimentais envolvendo ensaios *in situ* e em laboratório, no caso da ponte de Durrães, ou com base nas informações de projeto, no caso da ponte do Côa. A realização de ensaios de vibração ambiental em ambas as pontes possibilitou a obtenção dos valores das frequências naturais para um conjunto de modos de vibração envolvendo sobretudo movimentos na direção transversal. A calibração automática dos modelos numéricos foi realizada com base numa técnica iterativa e assente num algoritmo genético. Os resultados da calibração de ambos os modelos numéricos mostraram uma boa correlação com os resultados experimentais e sobretudo uma melhoria significativa face aos modelos numéricos antes da calibração. Os modelos numéricos calibrados poderão ser utilizados na simulação da resposta dinâmica da ponte sob ação de tráfego tendo em vista a avaliação da segurança estrutural e do tráfego e o conforto dos passageiros.

2 AS PONTES FERROVIÁRIAS

A ponte do Côa, ilustrada na Figura 1, foi contruída no final da década de 40 do século XX, e pertence à linha da Beira Alta onde realiza a travessia ferroviária do rio Côa (REFER, 1944). A ponte em alvenaria de pedra de granito tem um comprimento total de 238 m e 4,8 m de largura e é formada por oito arcos, um com 38 m de vão e os restantes com 20 m, apoiados em sete pilares e dois encontros. Os pilares têm alturas variáveis, sendo a máxima variação em altura entre a fundação e o pavimento de aproximadamente 56 m.

Os arcos, as camadas exteriores dos pilares e as fundações são formados por aduelas de pedra regular com espessura variável, denominada de alvenaria regular. As camadas interiores dos pilares são na maioria dos casos constituídas por pedras irregulares misturadas com cimento e argamassa, denominada de alvenaria de enchimento. A única exceção é o interior dos 2 pilares centrais, mais altos, em que os primeiros 18 m de desenvolvimento desde a fundação são também em alvenaria regular. Sob os arcos e encontros assentam paredes tímpano em alvenaria de pedra com espessura variável. O enchimento da ponte, situado entre as paredes tímpano, é formado por duas camadas, a inferior composta por alvenaria de enchimento e a superior por pedra seca assente sobre uma membrana impermeável. A única via férrea que percorre a ponte é formada por travessas bi-bloco e carril do tipo UIC60, assentes numa camada de balastro de aproximadamente 50 cm.



Figura 1. Ponte do Côa.

A ponte de Durrães, ilustrada na Figura 2, é datada dos finais do século XIX e localiza-se na linha do Minho que estabelece a ligação ferroviária entre as cidades do Porto e Valença. A ponte apresenta um sistema estrutural em arcos de alvenaria de granito e desenvolve-se ao longo de uma extensão de cerca de 178 m, com tabuleiro em perfil longitudinal retilíneo com 5,3 m de largura. A ponte é constituída por 16 arcos, com um vão livre de 8 m e que se apoiam em 15 pilares e dois encontros, e apresenta um desnível máximo entre as cotas do terreno e da via igual a 22 m.

Sobre os arcos e pilares assentam as paredes de tímpano, formadas por fiadas horizontais de pedra aparelhada. Os arcos têm espessura constante de 0,7 m. A altura dos pilares, medida entre a cota superior do soco e a cota do arranque do arco varia entre 11 m e 12 m, com exceção do pilar mais curto junto ao encontro sul. Os dois pilares localizados a cerca de 1/3 e 2/3 da extensão total da ponte têm sensivelmente o dobro da área da secção transversal dos restantes pilares. O terreno de fundação é constituído por uma camada de terra vegetal com profundidade variável sobre o terreno rochoso no qual assentam os maciços de fundação dos

pilares. A via-férrea é de via única e constituída por travessas do tipo bi-bloco e carris do tipo UIC60, que assentam numa camada de balastro com altura aproximadamente igual a 0,5 m.



Figura 2. Ponte de Durrães.

3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

O modelo numérico tridimensional de elementos finitos da ponte do Côa foi desenvolvido no software ANSYS e encontra-se apresentado na Figura 3. Os componentes da ponte foram modelados por intermédio de elementos finitos de volume tetraédricos, tendo sido discretizadas nove zonas, de modo a permitir atribuir a cada uma as propriedades específicas dos materiais que as constituem. Na Figura 3 são identificadas as nove zonas a diferentes cores. Os parâmetros dos materiais que compõem cada zona foram assim representados por um único material, correspondendo a uma homogeneização dos parâmetros de cada constituinte formado por blocos de pedra, argamassa e interfaces. As condições de fronteira foram estabelecidas usando apoios rígidos para bloquear os deslocamentos dos nós da malha da ponte localizados na base das fundações.

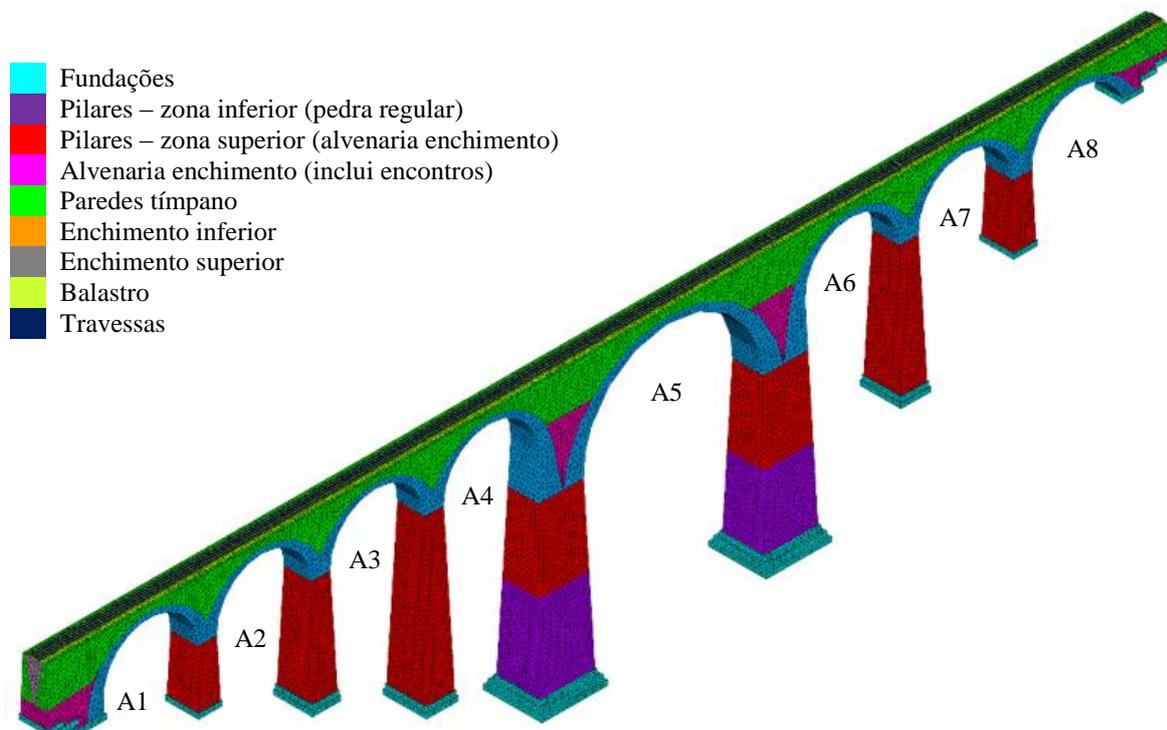


Figura 3. Modelo numérico da ponte do Côa.

Na Tabela 1 são descritos os principais parâmetros geométricos e mecânicos do modelo numérico da ponte, incluindo a designação, o valor adotado no modelo inicial e a respetiva unidade. Adicionalmente são também indicados os limites inferior e superior dos parâmetros que serão utilizados mais adiante na fase de calibração. A caracterização da geometria e dos materiais das diversas zonas da ponte baseou-se na consulta dos elementos do projeto (desenhos e memória descritiva) (REFER, 1944) e em observações recolhidas por inspeção visual (Lopes, 2012). O fator de correção do módulo de elasticidade do enchimento (K_f) é um parâmetro que possibilita a correção simultânea dos valores dos módulos de elasticidade dos enchimentos inferior e superior e foi inicialmente assumido igual a 1,0. O intervalo de variação deste parâmetro traduz a significativa variabilidade dos valores dos módulos de deformabilidade dos enchimentos, cuja informação, aliás, é inexistente nos elementos de projeto.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais da ponte do Côa

Parâmetro	Elemento	Valor adotado	Limites inferior/superior	Unidade
Módulo de elasticidade	Pilares, arcos e fundações - alvenaria regular (E_1)	15,3	10 / 30	GPa
	Pilares - alvenaria de enchimento (E_2)	15,3	10 / 18,2	
	Enchimento inferior	1,5	- / -	
	Enchimento superior	0,15	- / -	
	Balastro	0,15	- / -	
	Travessas	20	- / -	
	Carril	210	- / -	
Densidade	Alvenaria	24,5	- / -	kg/m ³
	Enchimento inferior	22,6	- / -	
	Enchimento superior	21,6	- / -	
	Balastro	20	- / -	
	Travessas	2890	- / -	
	Carril	7850	- / -	
K_f	Fator de correção do módulo de elasticidade dos enchimentos	1,0	0,3 / 6,7	-

Na Figura 4 apresentam-se os valores das frequências de alguns dos modos de vibração da ponte do Côa e as correspondentes configurações modais obtidas a partir do modelo numérico desenvolvido com base nos valores adotados dos parâmetros que constam da Tabela 1. Os modos apresentados envolvem sobretudo movimentos na direção transversal e estão em correspondência com os modos identificados na campanha experimental.

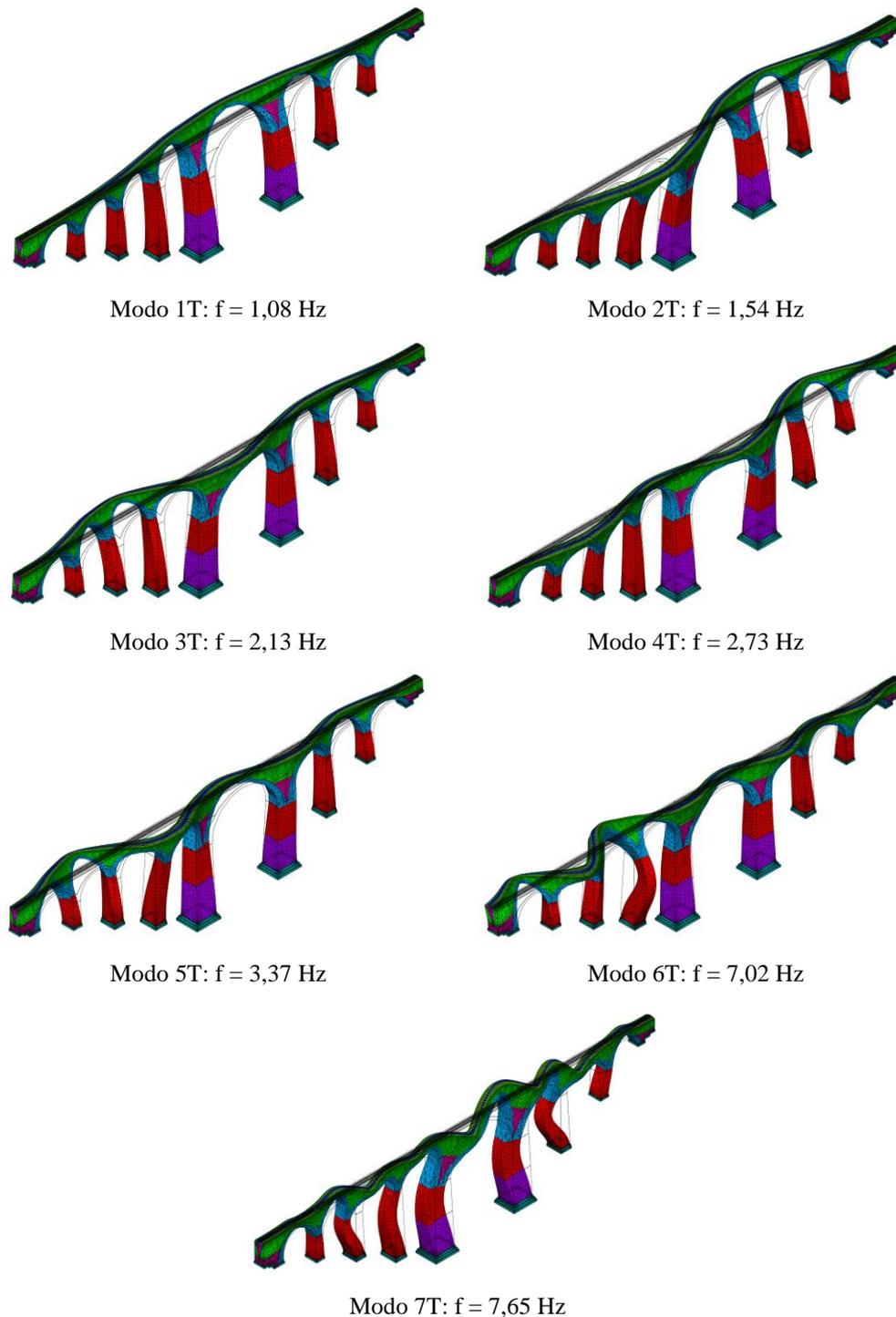


Figura 4. Modos de vibração da ponte do Côa obtidos por via numérica.

A modelação numérica da ponte de Durrães foi realizada com recurso a um modelo tridimensional de elementos finitos, desenvolvido no programa ANSYS. Na Figura 5 apresenta-se uma perspetiva do modelo numérico com a identificação dos vários componentes estruturais. Os arcos, os pilares, os tímpanos, os enchimentos, os encontros, as fundações, o aterro, o balastro e as travessas, foram modelados por intermédio de elementos finitos de volume de forma hexaédrica e paralelepédica de 6 e 8 nós, respetivamente. Os carris foram modelados através de elementos finitos de viga. A geometria do modelo teve por base um

levantamento topográfico efetuado na ponte, bem como dados provenientes de campanha experimental preliminar, nomeadamente dos ensaios com GPR (Ground Penetrating Radar) e DPSH (Dynamic Probing Super Heavy), e detalhes disponíveis em desenhos de projeto (Costa et al., 2016). As condições de fronteira foram estabelecidas usando apoios rígidos para bloquear todos os deslocamentos dos nós da malha de elementos finitos localizados na base das fundações e dos encontros.

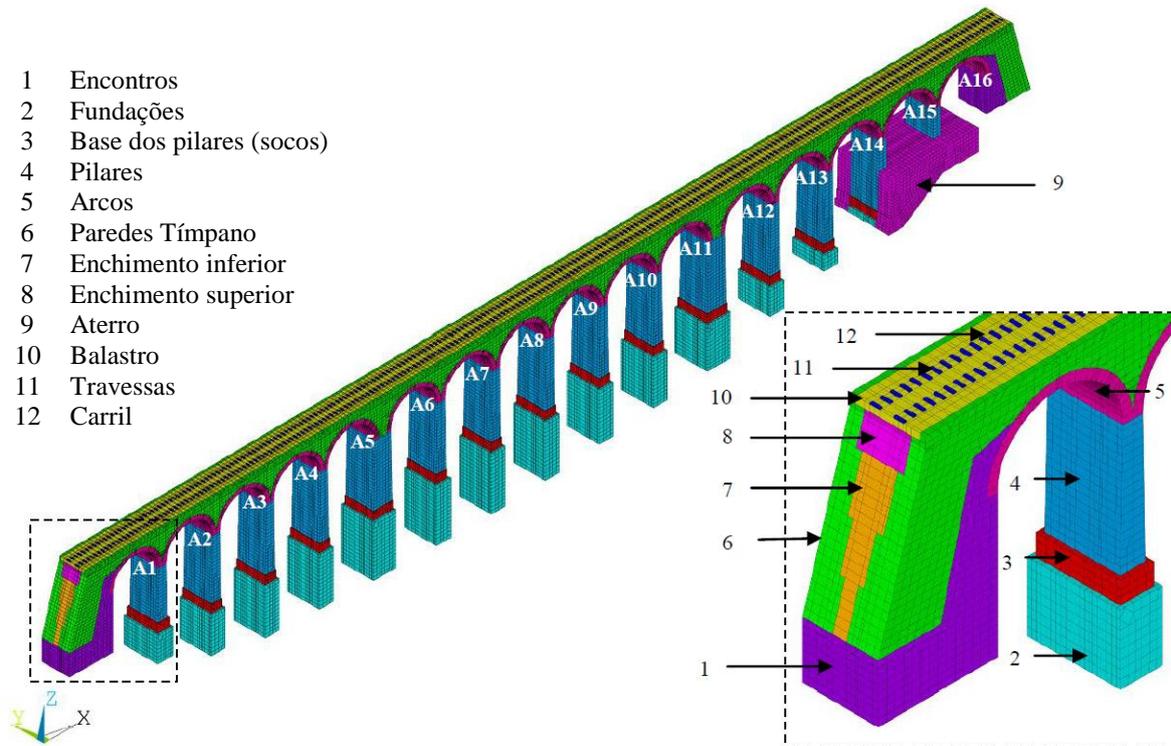


Figura 5. Modelo numérico da ponte de Durrães

Na Tabela 2 são descritos os principais parâmetros geométricos e mecânicos do modelo numérico da ponte, incluindo a designação, o valor adotado no modelo inicial e a respetiva unidade.

Os valores adotados para alguns dos parâmetros numéricos foram definidos com base nos resultados de uma campanha experimental preliminar que envolveu ensaios em campo e ensaios em laboratório (Costa et al., 2016). Assim, os valores do módulo de deformabilidade da alvenaria foram estimados através de ensaios de macacos planos. Os valores do módulo de deformabilidade dos materiais de enchimento foram estimados através de ensaios com o pressiómetro de Ménard. O módulo de deformabilidade da pedra e das juntas foram também estimados em ensaios de corte e compressão realizados em laboratório com base em amostras extraídas da ponte.

Importa ainda realçar que uma inspeção visual da ponte permitiu identificar várias anomalias ao longo do desenvolvimento ponte, nomeadamente a fendilhação longitudinal no intradorso dos arcos, sob os tímpanos e na zona central do eixo da ponte, com particular incidência nos arcos A3, A5, A10, A12, A13, A15 e A16 (de acordo com a numeração da Figura 5).

Os parâmetros K_1 a K_8 representam os fatores de correção do módulo de elasticidade dos elementos em alvenaria, nomeadamente dos arcos, tímpanos, pilares e encontros, localizados

em diferentes zonas da ponte. Para este efeito foram definidas oito zonas que correspondem ao agrupamento dos elementos de alvenaria pertencentes a cada 2 vãos consecutivos (A1-A2, A3-A4, ..., A13-A14 e A15-A16). Os parâmetros K_1 a K_8 apresentam um intervalo de variação entre 0,40 e 1,40, sendo que os fatores de correção com valores iguais a 1,00 correspondem à situação em que os parâmetros elásticos assumem os valores iniciais indicados na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos materiais da ponte de Durrães

Parâmetros	Designação	Valor adotado	Limites inferior / superior	Unidades	
E_{fund}	Módulo de elasticidade da alvenaria das fundações	15	- / -	GPa	
ρ_{fund}	Peso volúmico da alvenaria das fundações	2497,5	- / -	kg/m ³	
E_g	Módulo de elasticidade da alvenaria dos arcos, pilares, encontros e paredes tímpano	10	- / -	GPa	
ρ_g	Peso volúmico da alvenaria dos arcos, pilares, encontros e paredes tímpano	2497,5	- / -	kg/m ³	
$E_{e,inf}$	Módulo de elasticidade do enchimento	Camada inferior	1,0	- / -	GPa
$E_{e,sup}$		Camada superior	0,6	- / -	GPa
$\rho_{e,inf}$	Peso volúmico do enchimento	Camada inferior	2303,8	- / -	kg/m ³
$\rho_{e,sup}$		Camada superior	2201,8	- / -	kg/m ³
E_{at}	Módulo de elasticidade do aterro	0,75	- / -	GPa	
ρ_{at}	Peso volúmico do aterro	2000	- / -	kg/m ³	
E_b	Módulo de elasticidade do balastro	0,145	- / -	GPa	
ρ_b	Peso volúmico do balastro	2000	- / -	kg/m ³	
E_t	Módulo de elasticidade do betão das travessas	36	- / -	GPa	
ρ_t	Peso volúmico do betão das travessas	2890	- / -	kg/m ³	
E_a	Módulo de elasticidade do aço do carril	210	- / -	GPa	
ρ_a	Peso volúmico do aço do carril	7850	- / -	kg/m ³	
K_i ($i=1a8$)	Fator de correção módulo de elasticidade da alvenaria	1,0	0,4 / 1,4	-	

Na Figura 6 apresentam-se os valores das frequências de alguns dos modos de vibração da ponte de Durrães e as correspondentes configurações modais obtidas a partir do modelo numérico desenvolvido com base nos valores adotados dos parâmetros que constam da Tabela 2. Os modos apresentados envolvem sobretudo movimentos na direção transversal e longitudinal e estão em correspondência com os modos identificados na campanha experimental.

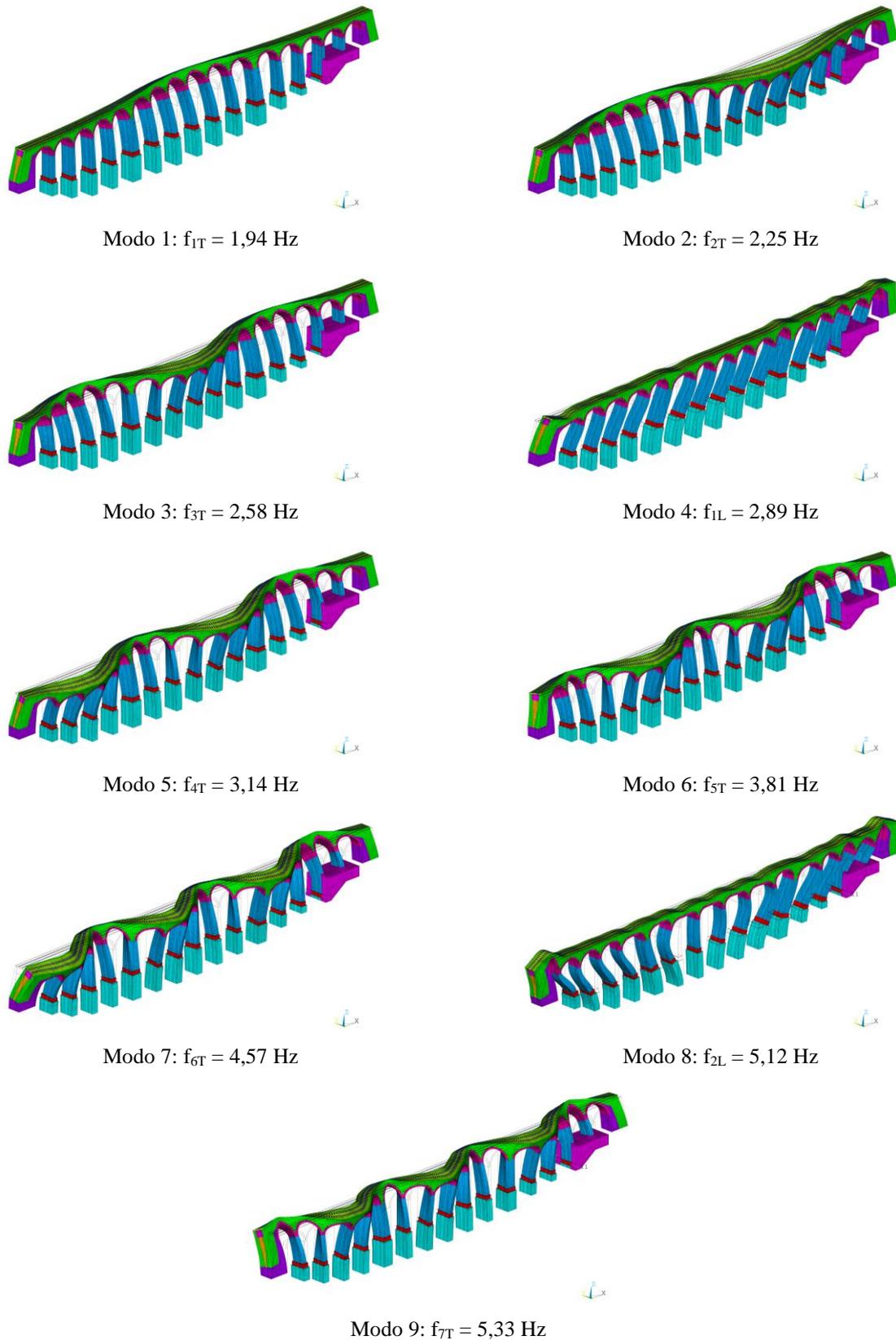


Figura 6. Modos de vibração da ponte de Durrães obtidos por via numérica.

4 ENSAIOS DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

Os ensaios de vibração ambiental levados a cabo nas duas pontes tiveram como objetivo a identificação das propriedades dinâmicas globais de cada estrutura, nomeadamente, as frequências e configurações dos principais modos de vibração e respetivos coeficientes de amortecimento. Os resultados destes ensaios servirão de base à calibração de modelos numéricos de elementos finitos de cada uma das pontes.

Todos os ensaios envolveram a utilização de acelerómetros piezoelétricos, modelo 393B12 da marca PCB, para a medição da resposta dinâmica da estrutura. Estes acelerómetros têm uma elevada sensibilidade, 10 V/g, permitindo medir acelerações na gama de valores $\pm 0,5g$ e numa gama de frequências entre 0,15 Hz e 1000 Hz. A aquisição de dados foi realizada através de um sistema cDAQ-9172 da National Instruments, tendo-se recorrido a módulos NI 9234 para acelerómetros do tipo IEPE. As séries temporais foram adquiridas ao longo de períodos de 8 a 10 minutos, com uma frequência de amostragem de 2048 Hz, e posteriormente decimadas para 256 Hz.

4.1 Configurações experimentais

O ensaio dinâmico da ponte do Côa foi realizado com base numa técnica que considera pontos de referência fixos e pontos móveis, e envolveu o recurso a 16 acelerómetros. A resposta ambiental foi avaliada em termos das acelerações nas direções vertical (z), transversal (y) e longitudinal (x), num total de 25 pontos de medição, dispostos em duas configurações experimentais (Figura 7a). Os acelerómetros foram posicionados no tabuleiro, mais concretamente na extremidade de um dos passeios, e foram fixados à estrutura por intermédio de cantoneiras metálicas coladas sobre a superfície de pedra (Figura 7b).

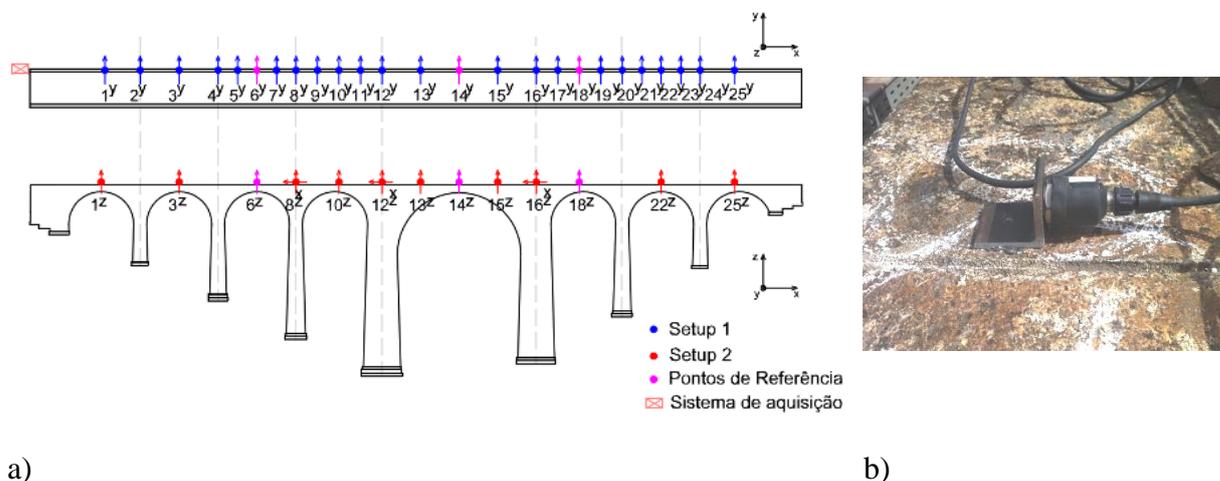
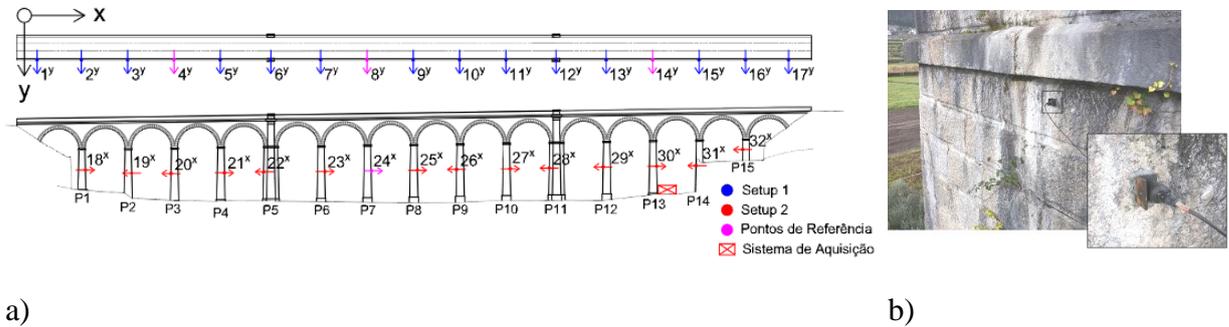


Figura 7. Ensaio de vibração ambiental da ponte do Côa: plano e planta com os pontos de medição.

O ensaio dinâmico da ponte de Durrães foi também realizado com base numa técnica que considera pontos de referência fixos e pontos móveis, e envolveu o recurso a 20 acelerómetros. A resposta ambiental foi avaliada em termos das acelerações nas direções longitudinal (x) e transversal (y), num total de 32 pontos de medição: 17 localizados no tabuleiro, sobre uma das guardas laterais, e 15 na face dos pilares. As medições foram realizadas em duas configurações experimentais conforme o plano de ensaio apresentado na Figura 8a. A ligação dos acelerómetros às guardas laterais e aos pilares foi efetuada por

intermédio de chapas ou cantoneiras metálicas coladas ou aparafusadas à superfície da pedra. Os acelerómetros foram colocados nos pilares com auxílio de uma plataforma elevatória com braço extensível. Na Figura 8b é apresentado o pormenor de um dos acelerómetros localizado na face de um pilar da ponte.



a)

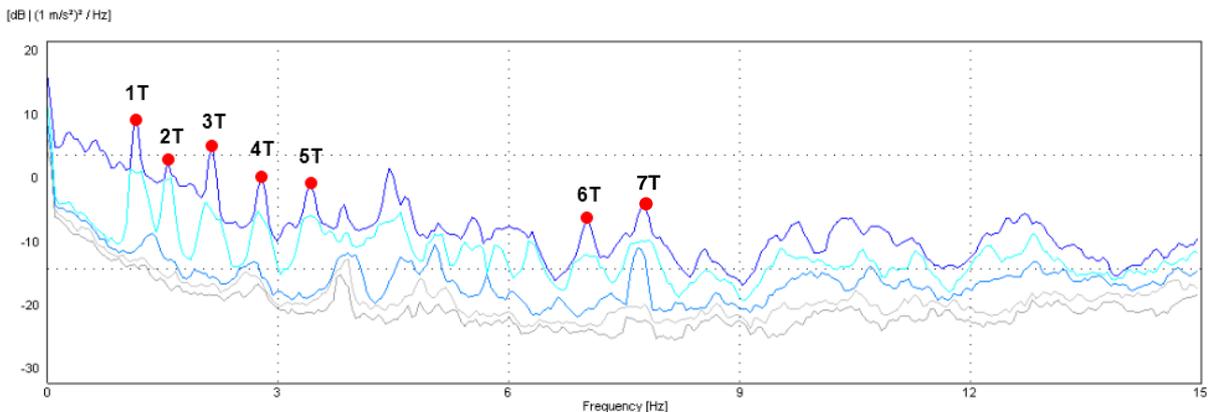
b)

Figura 8. Ensaio de vibração ambiental da ponte de Durrães: a) configuração experimental; b) acelerómetro no pilar.

4.2 Identificação dos parâmetros modais

A identificação dos parâmetros modais das pontes do Côa e Durrães foi realizada por intermédio da aplicação da versão melhorada do método de decomposição no domínio da frequência (EFDD) com recurso ao programa ARTeMIS (ARTeMIS, 2009). Neste método as frequências naturais são identificadas com base nos valores das abcissas dos picos dos valores singulares, sendo as configurações modais determinadas a partir da informação dos correspondentes vetores singulares.

Na Figura 9 apresentam-se os valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros das configurações experimentais que envolvem sensores predominantemente na direção transversal para as pontes do Côa (Figura 9a) e de Durrães (Figura 9b). Nas figuras são assinalados os picos correspondentes a 7 dos modos de vibração globais identificados na direção transversal (1T a 7T), para ambas as pontes. No caso da ponte de Durrães os 2 modos de vibração identificados na direção longitudinal foram obtidos a partir da configuração experimental com sensores móveis localizados na direção longitudinal.



a)

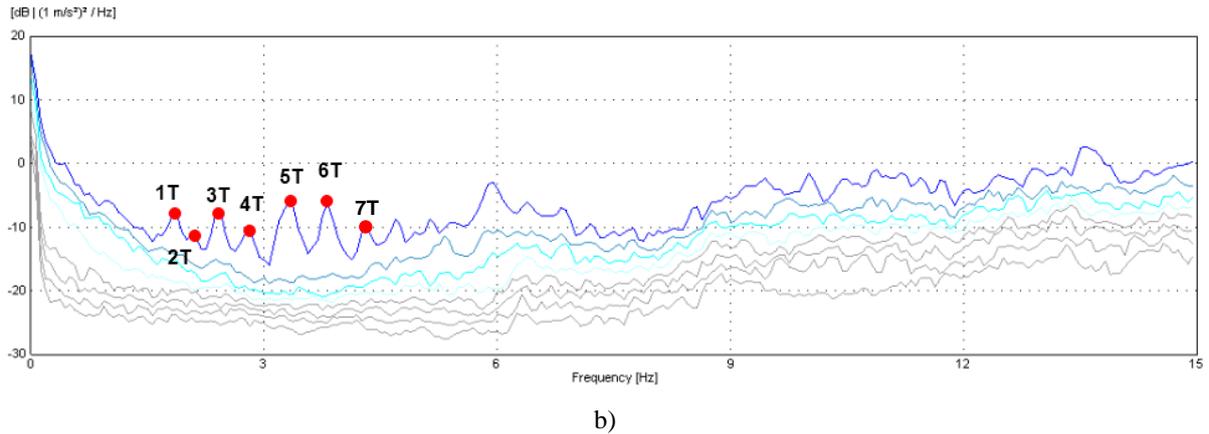
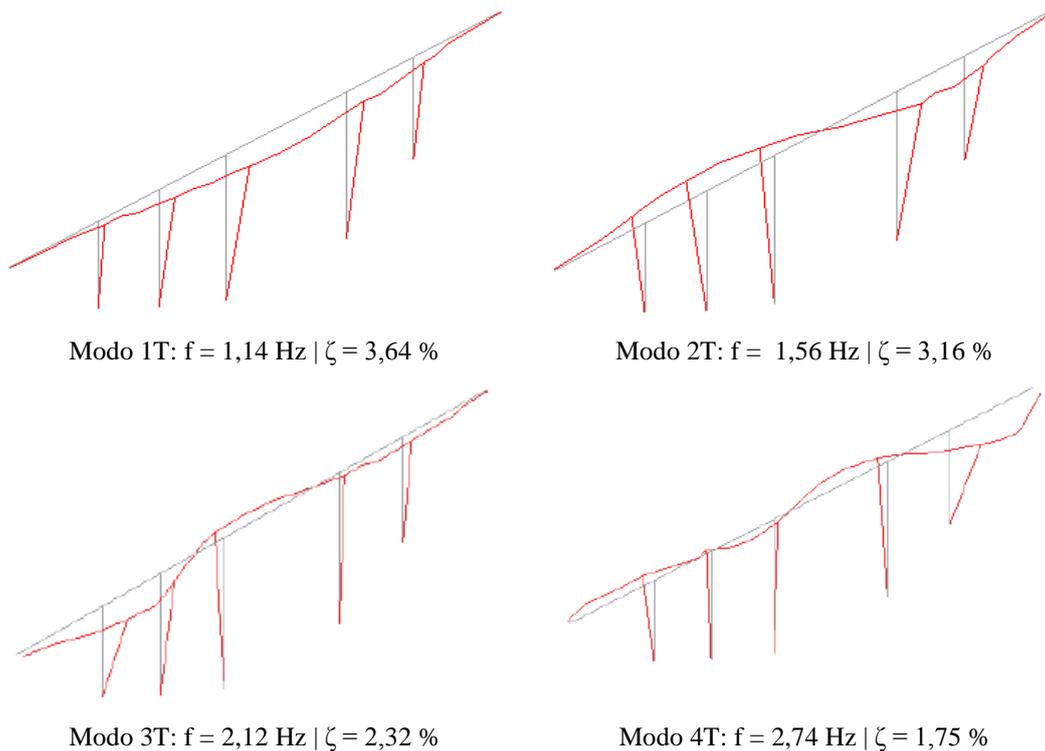


Figura 9. Método EFDD - valores singulares médios e normalizados das matrizes dos espectros obtidos a partir da configuração experimental com sensores móveis localizados na direção transversal: a) ponte do Côa; b) ponte de Durrães.

Nas Figuras 10 e 11, ilustram-se, em perspetiva, as configurações relativas dos 7 modos de vibração transversais, no caso da ponte do Côa, e dos 9 modos de vibração nas direções transversal e longitudinal, no caso da ponte de Durrães. São ainda indicados os valores médios das frequências e dos respectivos coeficientes de amortecimento.



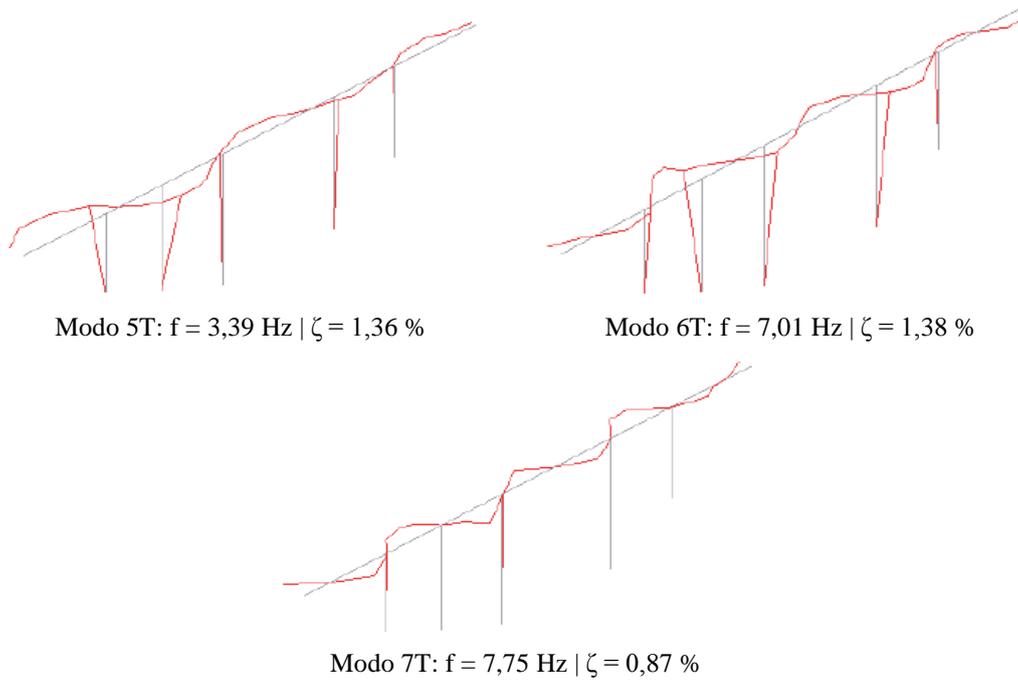
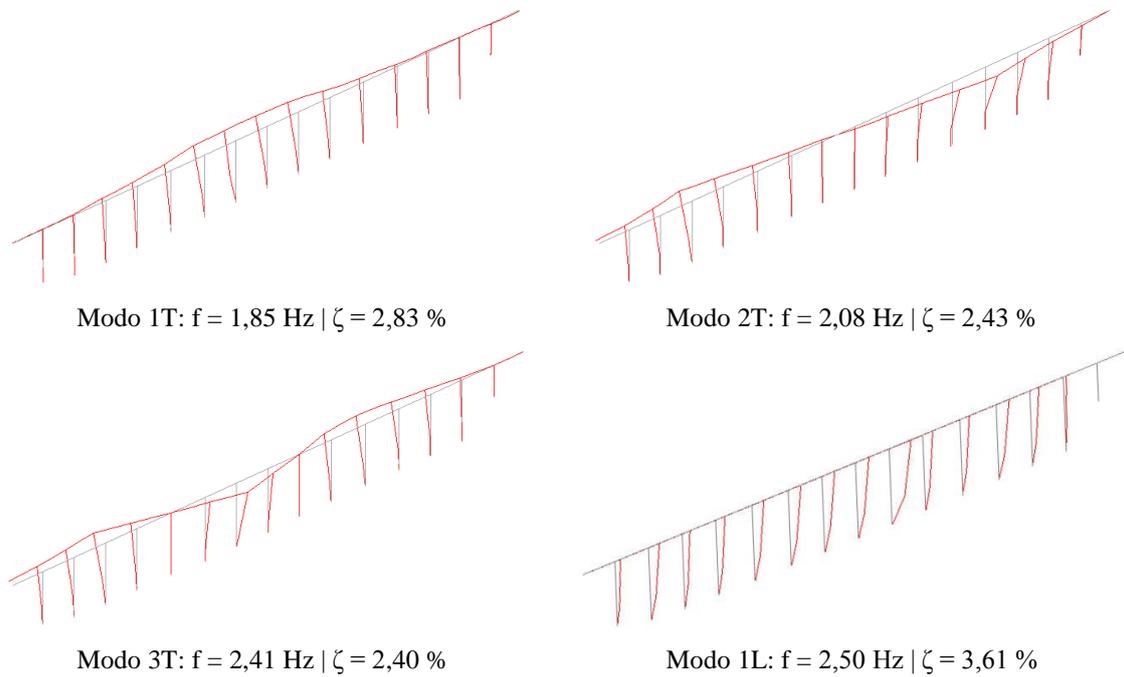


Figura 10. Parâmetros modais da ponte do Côa obtidos por via experimental.



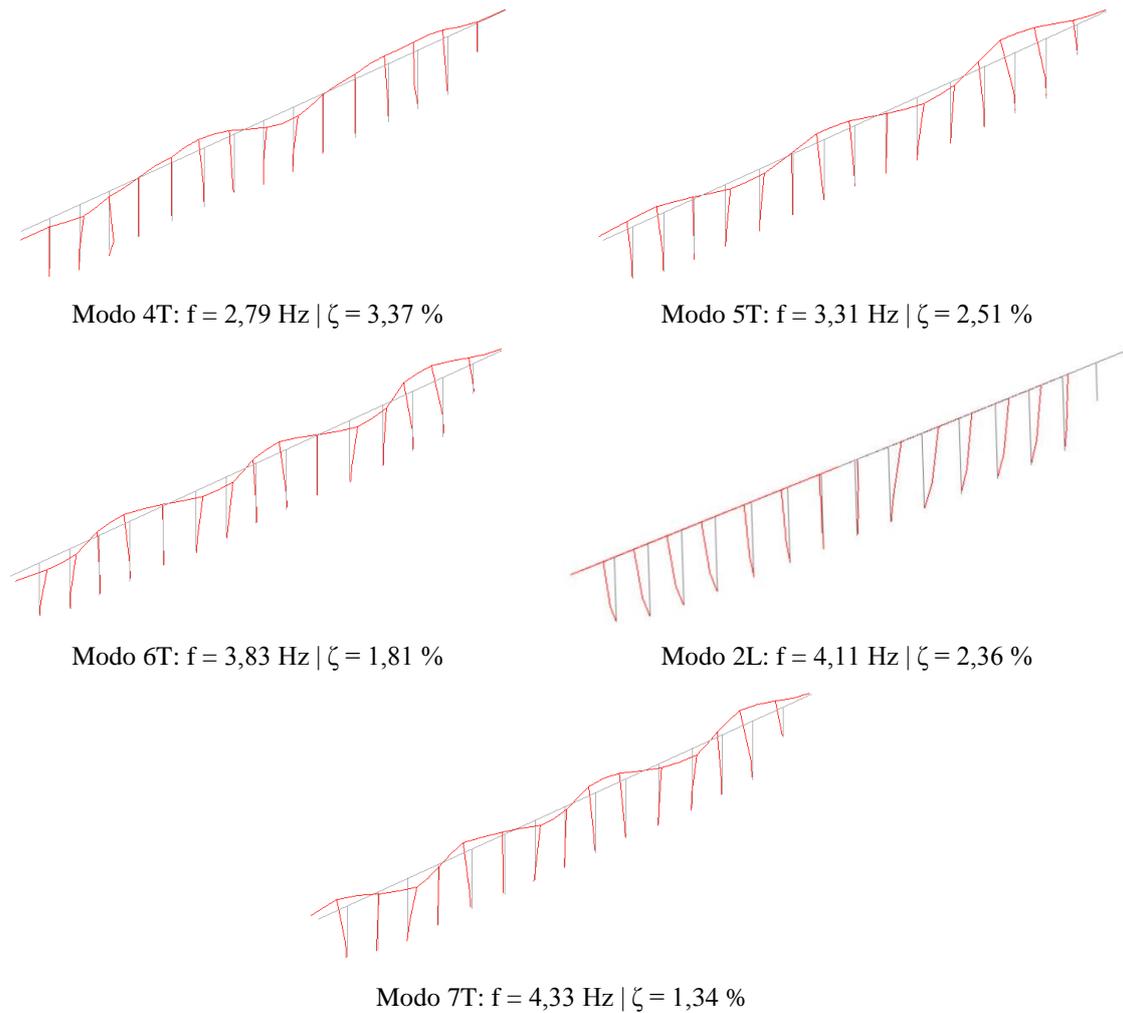


Figura 11. Parâmetros modais da ponte de Durrães obtidos por via experimental.

5 CALIBRAÇÃO

5.1 Metodologia

A metodologia de calibração iterativa baseada num algoritmo genético envolve a utilização de três softwares: ANSYS (ANSYS, 2011), Matlab (Mathworks, 2011) e OptiSlang (OptiSlang, 2008). Na Figura 12 apresenta-se o fluxograma que ilustra a implementação computacional do método com a indicação das operações realizadas por cada software (Ribeiro et al., 2012).

Em ANSYS é desenvolvido o modelo numérico em elementos finitos tendo por base um conjunto inicial de valores para os parâmetros $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$, onde k representa o número de indivíduos de cada geração. A seleção dos parâmetros de calibração tem por base os resultados de uma análise de sensibilidade prévia. Os conjuntos de valores dos parâmetros da primeira geração são gerados aleatoriamente recorrendo ao método do Hipercubo Latino. Após gerado cada modelo com base nos respetivos parâmetros numéricos é efetuada uma análise modal a partir da qual são obtidas as frequências de vibração e as correspondentes configurações modais.

Em Matlab, tendo por base a informação modal numérica e experimental, é realizado o emparelhamento entre os modos numéricos e experimentais com base no parâmetro MAC, e são gravados em ficheiros de texto os valores das frequências e dos parâmetros MAC.

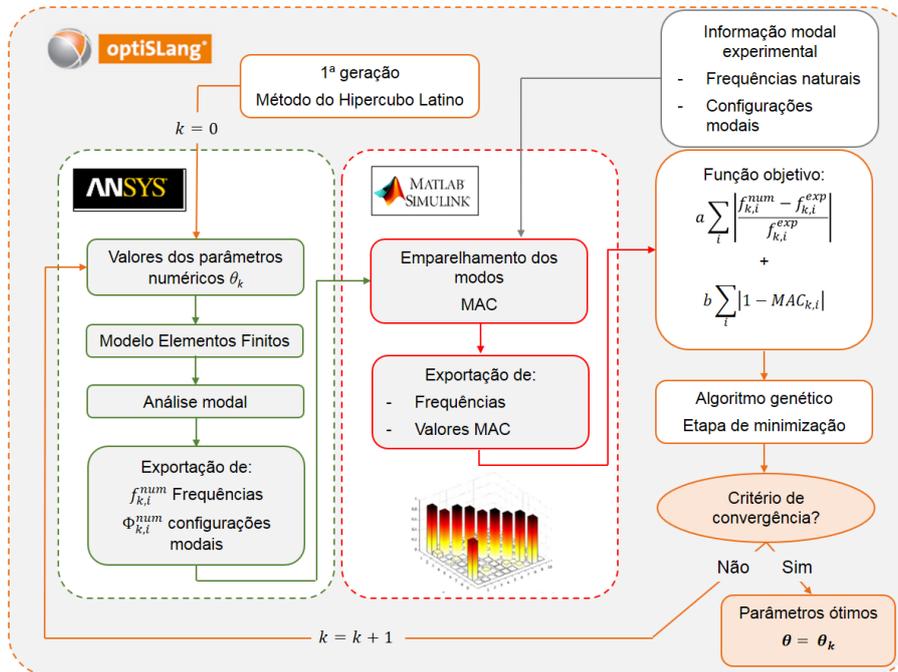


Figura 12. Fluxograma da metodologia de calibração iterativa baseada num algoritmo genético.

Por último, o programa OptiSlang calcula os resíduos da função objetivo para cada um dos indivíduos e com base num algoritmo genético estima um novo conjunto de indivíduos tendo em vista a minimização da função objetivo. A geração destes novos indivíduos baseia-se em operações de reprodução, mutação e substituição. Este procedimento é repetido iterativamente até ser atingido o número limite de gerações.

5.2 Otimização

A otimização do modelo numérico da ponte do Côa envolveu um total de 3 parâmetros numéricos e 14 respostas modais, 7 frequências e 7 parâmetros MAC. O algoritmo genético foi baseado em uma população inicial que consiste em 30 indivíduos e 150 gerações, para um total de 4500 indivíduos. No algoritmo o número de elites foi considerado igual a 1 e o número de indivíduos de substituição foi também definido igual a 1. A taxa de cruzamento foi considerada igual a 50% e a taxa de mutação foi definida igual a 15% com um desvio padrão variável ao longo a otimização, entre 0,10 e 0,01. Os pesos da função objetivo a e b foram considerados iguais a 1,0.

Na Figura 13 apresentam-se as relações entre os valores numéricos dos parâmetros E_1 , E_2 e K_f e os limites correspondentes (indicados na Tabela 1) para três casos de otimização (GA1 a GA3) independentes e com diferentes populações iniciais. Um rácio de 0% significa que o parâmetro coincide com o limite inferior. Um rácio de 100% significa que ele coincide com o limite superior. Os valores obtidos para os parâmetros numéricos são também indicados entre parêntesis.

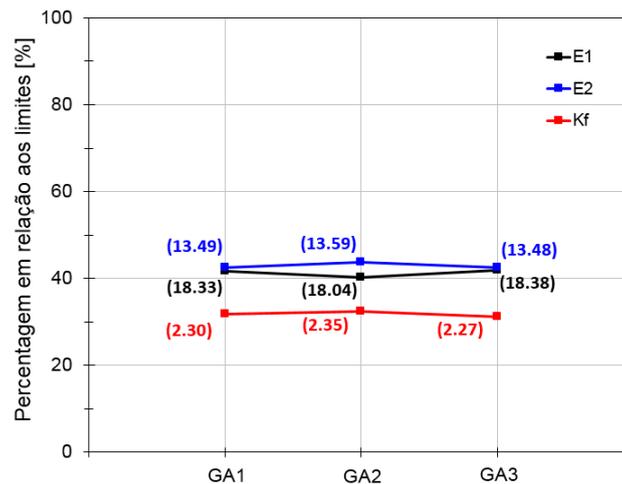


Figura 13. Valores finais dos parâmetros da otimização da Ponte do Côa.

A Figura 14 mostra os valores do erro entre as frequências numéricas e experimentais, antes e após a calibração, tomando como referência os valores das frequências experimentais. Os resultados após calibração são referentes ao caso de otimização GA1, o qual está associado ao menor resíduo da função objetivo. O erro médio das frequências diminuiu de 2,0%, antes da calibração, para 0,7% após a calibração. Por sua vez, o valor médio do parâmetro MAC apresenta valores praticamente coincidentes antes e após a calibração e iguais a 0,960.

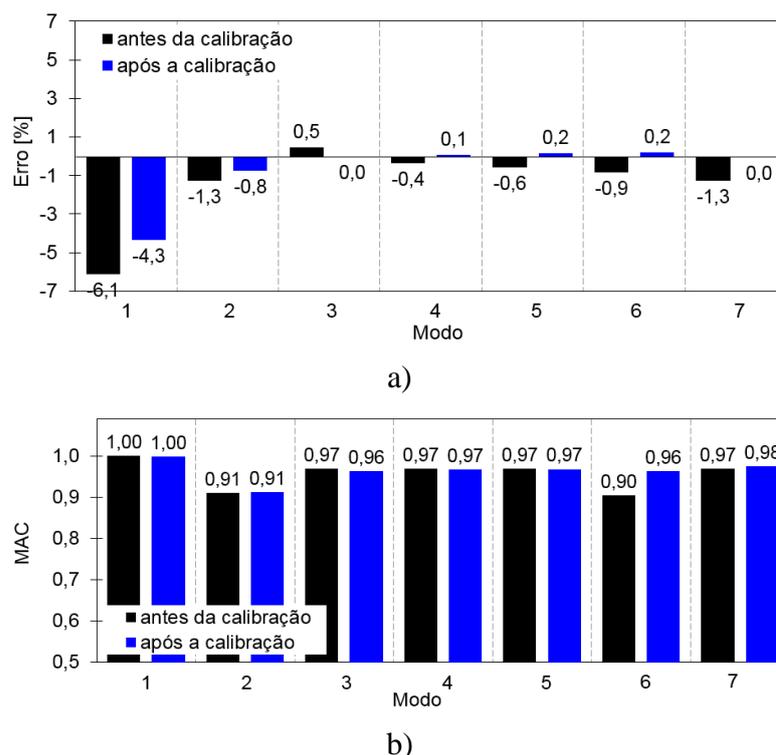


Figura 14. Análise de correlação antes e após a calibração do modelo numérico da ponte do Côa: a) frequências; b) parâmetros MAC.

A otimização do modelo de ponte de Durrães envolveu o uso de 8 parâmetros numéricos e 18 respostas modais, 9 frequências e 9 parâmetros MAC. Os parâmetros do algoritmo genético foram idênticos aos utilizados na otimização do modelo numérico da ponte do Côa,

com exceção dos pesos da função objetivo a e b que foram considerados iguais a 1,10 e 0,90, respetivamente.

Nas Figuras 15a e 15b apresentam-se as relações entre os valores numéricos dos parâmetros K1 a K8 e os limites correspondentes (indicados na Tabela 2) para quatro casos de otimização (GA1 a GA4) independentes e com diferentes populações iniciais. Os valores obtidos para os parâmetros numéricos são também indicados entre parêntesis.

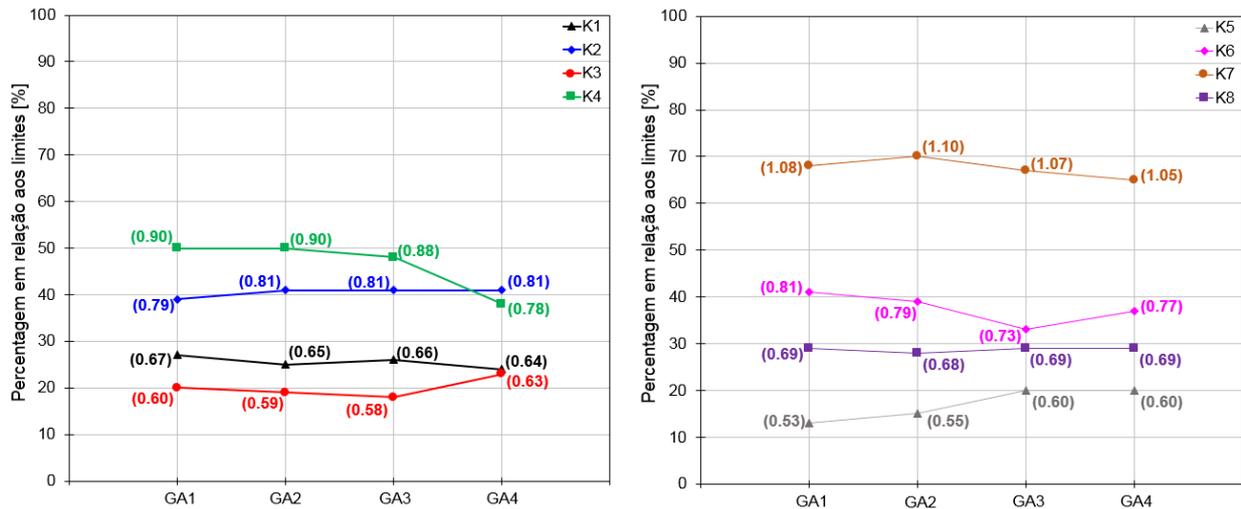


Figura 15. Valores dos parâmetros numéricos para os casos de otimização GA1 a GA4

Os resultados da otimização mostram que, na maioria das zonas, existe uma tendência para reduzir a rigidez estrutural elementos. Este resultado está em linha com os resultados da inspeção visual em que foram identificadas várias anomalias ao longo do desenvolvimento da ponte (Costa et al., 2016). As zonas de ponte, onde existe uma maior tendência de degradação da rigidez estão associadas aos parâmetros K3, K5 e K8, que correspondem às zonas A5-A6, A9-A10 e A15-A16, respetivamente.

Em geral, os resultados dos diferentes casos de otimização são muito próximos uns dos outros, com variações inferiores a 15%, demonstrando a estabilidade e a robustez do algoritmo genético.

A Figura 16a e 16b mostra os valores do erro entre as frequências numéricas e experimentais, antes e após a calibração, tomando como referência os valores das frequências experimentais. Os resultados após calibração são encaminhados para a otimização GA3, o qual está associado ao menor resíduo da função objetivo. O erro médio das frequências diminuiu de 14,5%, antes da calibração, para 4,0% após a calibração. Por sua vez, o valor médio do parâmetro MAC passou de 0,901, antes da calibração, para 0,926 após a calibração.

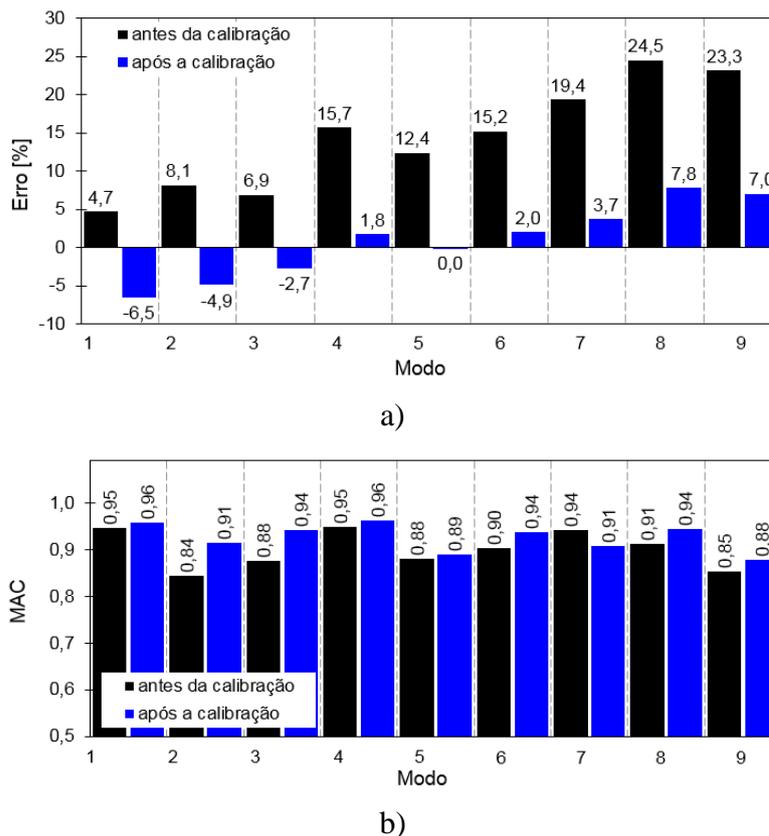


Figura 16. Análise de correlação antes e após a calibração do modelo numérico da ponte de Durrães: a) frequências; b) parâmetro MAC.

6 CONCLUSÕES

Neste artigo são abordados vários aspetos sobre o desenvolvimento e calibração experimental de modelos numéricos de duas pontes em arco de alvenaria de pedra pertencentes à rede ferroviária Portuguesa.

A identificação experimental dos parâmetros modais foi baseada em ensaios de vibração ambiental, que permitiram estimar as frequências naturais e vários modos de vibração nas direções transversal e longitudinal recorrendo a uma técnica de identificação do domínio da frequência.

Os resultados da calibração dos modelos de ambas as pontes evidenciam uma muito boa concordância entre a resposta numérica e experimental. De facto, comparando com os resultados do modelo numérico definido antes da calibração, o modelo calibrado demonstrou melhorias significativas em simular parâmetros modais, como comprovado por desvios menores entre as frequências numéricas e experimentais e pelo aumento dos coeficientes MAC. No caso da ponte de Durrães, os resultados mostram uma tendência de otimização de reduzir a rigidez dos elementos estruturais da ponte que está de acordo com os resultados da inspeção visual onde foram identificadas várias anomalias ao longo do desenvolvimento ponte.

No futuro pretendem-se utilizar os modelos numéricos calibrados de ambas as pontes na sua validação sob ação de tráfego, em particular através da comparação das respostas em termos de deslocamentos, acelerações e deformações obtidas com base em análises dinâmicas com interação ponte-comboio, com as mesmas respostas obtidas através de um ensaio

dinâmico para a passagem de tráfego de mercadorias. É ainda intenção dos autores realizar uma simulação numérica do comportamento dinâmico de ambas as pontes sob ação de tráfego ferroviário considerando cenários mais exigentes em termos de velocidades de circulação e cargas por eixo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho inclui pesquisas realizadas com o apoio financeiro da “FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia”, Portugal, através do projeto PTDC/ECM-EST_1691/2012 - Caracterização Experimental e Numérica do Comportamento Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra sob Ação de Tráfego Ferroviário - Aplicação a Pontes Existentes em Portugal. Os autores agradecem à Eng.^a Ana Isabel Silva, ao Eng.^o Hugo Patrício e ao Eng.^o Nuno Lopes, da REFER, por toda a colaboração e informação cedida sobre as pontes, ao Eng. Nuno Pinto e ao Técnico Valdemar Luís, ambos técnicos do laboratório LESE, por sua assistência indispensável durante a preparação e execução de testes experimentais.

REFERÊNCIAS

ANSYS. Structural analysis guide – release 15.0. In: ANSYS I, editor; 2011.

ARTEMIS 2009 ARTEMIS Extractor Pro - Academic License. User's Manual. IN APS, S. V. S. (Ed. Aalborg, Denmark).

Arêde, A., Costa, P., Costa, A., Costa, C. and Noites, L., Monitoring and testing of a new stone masonry arch bridge in Vila Fria, Portugal in Arch'07, 2007, Funchal: UM.

Chetouane, B., Dubois, F., Vinches, M. and Bohatier, C., NSCD discrete element method for modelling masonry structures. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005. 64(1): p. 65-94.

Costa, C. D. Ribeiro, P. Jorge, R. Silva, A. Arêde e R. Calçada (2016) - "Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters", Engineering Structures, Volume 123, pp. 354-371.

Costa, C., Arêde, A., Costa, A., Caetano, E., Cunha, A. and Magalhães, F., Updating numerical models of masonry arch bridges by operational modal analysis. International Journal of Architectural Heritage, 2015.

Costa, C., Arêde, A. and Costa, A., Detailed FEM modelling of stone masonry arch bridges under road traffic moving loads. in Proceedings of the 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn), 2011, Corfu, Greece.

Costa, C., Arêde, A. and Costa, A., Mechanical characterization of the constituent materials of stone arch bridges. in 9th International Masonry Conference, 2004, Guimarães, Portugal.

Domede, N., Sellier, A. and Stablon, T., Structural analysis of a multi-span railway masonry bridge combining in situ observations, laboratory tests and damage modelling. Engineering Structures, 2013. 56: p. 837-849.

Fanning, P. J., Boothby, T. E. and Roberts, B. J., Longitudinal and transverse effects in masonry arch assessment. Construction and Building Materials, 2000. 15(1): p. 51-60.

Lopes, N. 2012. Inspeção de pontes ferroviárias em arcos de alvenaria. Relatório de projeto de mestrado em Reabilitação Urbana. Instituto Politécnico de Tomar, Tomar.

Mathworks. MATLAB – getting started guide. Natick, USA; 2011.

McCann, D. & Forde, M., Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT & E International, 2001. 34(2): p. 71-84.

OptiSLang. OptiSLang – the optimizing structural language. In: GmbH D, editor., 3.0 ed. Weimar, Germany; 2008.

Orbán, Z., UIC project on assessment, inspection and maintenance of masonry arch railway bridges in ARCH 07: 7th international conference on arch bridges, 2007,

REFER, E. 1944. Substituição da ponte do Côa. Projecto de execução - Memória descritiva e justificativa, Lisboa.

Ribeiro, D., Calçada, R., Delgado, R., Brehm, M. & Zabel, V. 2012. Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters. Engineering Structures, 40 413–435