

ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DA PONTE RAINHA SANTA ISABEL

Luís Oliveira Santos^(*), Jorge Rodrigues, Xu Min e Paulo Silveira

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas – Lisboa, Portugal

*Email: luisosantos@lnec.pt

RESUMO

A ponte Rainha Santa Isabel é uma obra de arte atirantada que atravessa o rio Mondego em Coimbra. No final da construção, esta obra de arte foi submetida a ensaios de carga estáticos e dinâmicos. Na presente comunicação descrevem-se os ensaios realizados, incluindo a instrumentação instalada bem como as sobrecargas a que a estrutura foi sujeita, e apresentam-se alguns dos resultados comparando-os com os valores calculados através do modelo numérico desenvolvido para auxiliar a preparação e interpretação dos resultados dos ensaios.

INTRODUÇÃO

A realização de ensaios de carga é uma forma singular de caracterizar o comportamento *in situ* de uma estrutura, permitindo a validação de teorias de comportamento e dos modelos estruturais considerados, bem como a caracterização do seu estado inicial, que poderá ser utilizado como uma referência ao longo da sua vida [5].

Neste contexto foram realizados os ensaios de carga da ponte Rainha Santa Isabel, sobre o rio Mondego em Coimbra. Foram realizados ensaios estáticos e dinâmicos. Nos ensaios estáticos foram utilizadas sobrecargas concentradas e distribuídas tendo-se procedido à medição de deslocamentos verticais e horizontais, rotações, extensões e das forças instaladas nos tirantes. Os ensaios dinâmicos tiveram como principal objectivo a determinação das características dinâmicas globais da estrutura, nomeadamente, as frequências, configurações e amortecimentos dos seus principais modos de vibração tendo-se para este efeito procedido à medição de acelerações em diversas secções do tabuleiro e no topo do mastro.

A envergadura da obra, bem como os diversos ensaios realizados e as distintas técnicas experimentais utilizadas, proporcionaram a obtenção de um conjunto de resultados e ensinamentos cuja divulgação é o objectivo da presente comunicação.

Assim, após uma breve descrição da estrutura e do modelo numérico desenvolvido para simular o seu comportamento durante os ensaios, descrevem-se os ensaios estáticos e dinâmicos realizados, referindo-se os equipamentos utilizados e a forma como foi efectuado o tratamento dos resultados. Finalmente, apresentam-se, alguns dos resultados obtidos que são comparados com os valores obtidos através do modelo numérico utilizado.

DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE

A ponte Rainha Santa Isabel é uma ponte atirantada com um único mastro, com suspensão central do tramo principal sobre o rio Mondego, em Coimbra, Portugal (Figura 1). Possui um comprimento total de 330,30 m, com um vão suspenso sobre o rio de 186,00 m, dois tramos na margem esquerda com vãos de 45,30 m e 50,63 m, e um tramo extremo na margem direita com um vão de 45,30 m. A suspensão do tabuleiro é assegurada por 19 pares de tirantes, que são equilibrados, ao nível do mastro, por 9 pares de tirantes de retenção. O mastro tem uma altura de 73 m acima da face inferior do tabuleiro e uma inclinação de 8° relativamente à vertical.



Figura 1 – Vista geral da ponte Rainha Santa Isabel

O tabuleiro tem uma secção transversal mista, 3,70 m de altura total e 30,00 m de largura, sendo formada por duas lajes de betão pré-esforçado, ligadas por uma treliça metálica espacial (Figura 2). A laje inferior, com 11,50 m de largura, serve a passagem de peões (Figura 3).



Figura 2 – Vista inferior do tabuleiro



Figura 3 – A laje inferior e a treliça metálica

MODELAÇÃO DA ESTRUTURA

Com o intuito de interpretar o comportamento da estrutura observado durante os ensaios estáticos e dinâmicos foi elaborado um modelo tridimensional de elementos finitos, tendo-se recorrido, para esse efeito ao programa SAP2000 [1]. A definição deste modelo foi efectuada com base nas características físicas e geométricas definidas no projecto, tendo-se utilizado um total de 1680 elementos de barra, 1780 elementos de casca e 8 elementos de ligação.

Os tubos metálicos que constituem as almas do tabuleiro e as vigas de ancoragem foram modelados através de elementos de barra, tendo-se recorrido a elementos de casca para simular o comportamento das lajes superiores e inferiores. A compatibilização entre os elementos de barra e os elementos de casca foi assegurada através de relações de dependência do tipo corpo rígido entre os graus de liberdade dos respectivos nós.

A modelação dos pilares, do mastro e dos tirantes foi efectuada através de elementos de barra. O efeito dos aparelhos de apoio que existem entre o tabuleiro e os pilares foi simulado através de elementos de ligação. Os coeficientes de rigidez foram definidos com valor de 1×10^{11} kN/m para a direcção vertical, 1×10^8 kN/m e zero para a direcção horizontal, respectivamente, no caso de serem fixos ou deslizantes.

O modelo de elementos finitos foi usado, primeiramente, para estimar os valores esperados das diversas grandezas a medir nos ensaios estáticos. Após os ensaios o modelo numérico foi objecto de calibração, ajustando vários parâmetros da estrutura, tais como o módulo de elasticidade do betão ou os coeficientes de rigidez dos elementos de ligação, de forma a que o modelo conseguisse simular os resultados experimentais com a maior precisão possível. O modelo calibrado foi depois utilizado para calcular as características dinâmicas da estrutura, designadamente, as frequências e configurações dos seus modos naturais de vibração.

Na Figura 4 é apresentado o modelo desenvolvido.

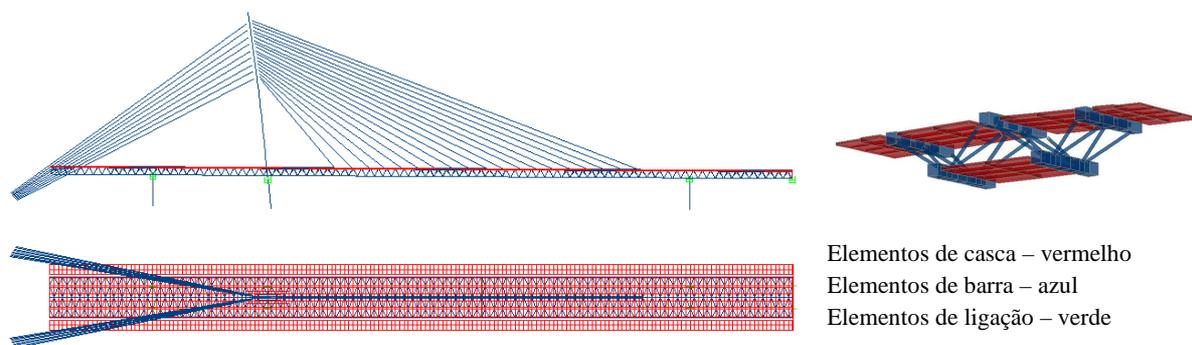


Figura 4 – Modelo numérico da ponte Rainha Santa Isabel

ENSAIOS ESTÁTICOS

Ensaios realizados

A realização dos ensaios estáticos foi dividida em duas fases. Na primeira fase recorreu-se a uma carga concentrada, constituída por seis camiões com uma carga total de 1777 kN, dispostos numa linha perpendicular ao eixo da ponte, com a qual se pretendeu determinar uma linha de influência das diversas grandezas observadas. Apesar de uma linha de influência ser, por definição, o efeito de uma carga rolante unitária, a dimensão da obra permite considerar o peso dos camiões utilizados como uma carga pontual [4], tornando possível a determinação de “linhas de influência” das grandezas observadas.

Na segunda fase dos ensaios estáticos utilizou-se uma carga distribuída materializada por dezasseis camiões dispostos em quatro colunas (Figura 5), constituindo uma carga total de 4761 kN, que foram dispostos em seis posições ao longo do tabuleiro. Foram efectuados alguns carregamentos excêntricos no tramo suspenso.

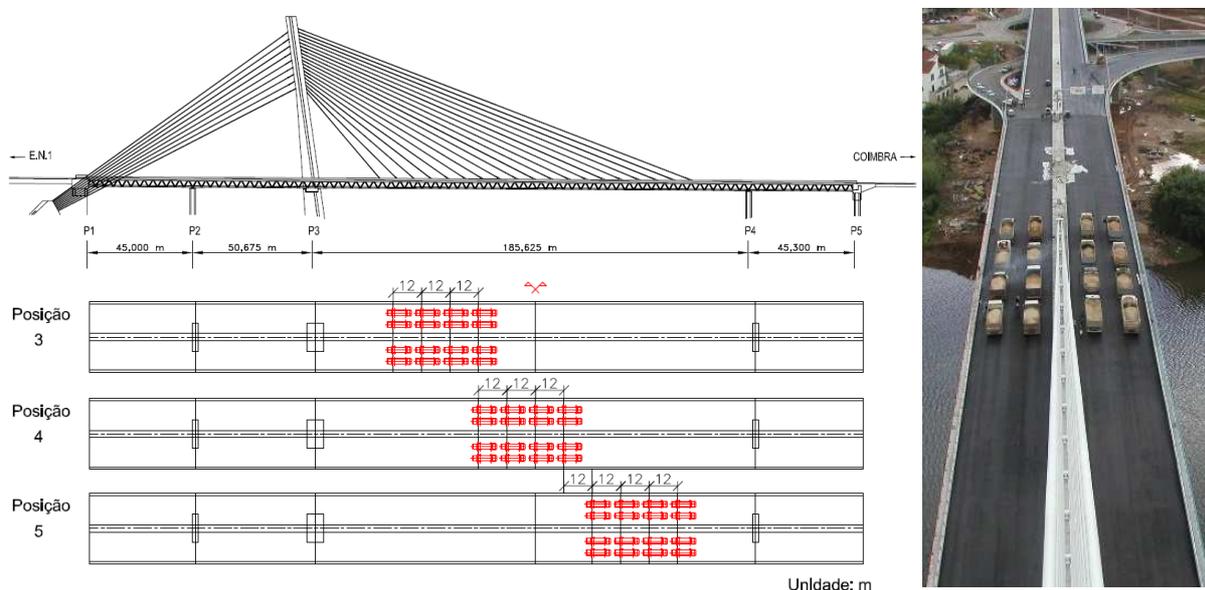


Figura 5 – Posições de carga com 16 camiões (3 a 5)

Instrumentação

Durante a construção a ponte foi instrumentada com uma série de equipamento de medição das várias grandezas que permitem a observação do comportamento da estrutura a longo prazo. Para este efeito foram instrumentadas diversas secções do tabuleiro e do mastro, designadamente com extensómetros de corda vibrante e termómetros eléctricos de resistência embebidos no betão das lajes e do mastro, e com extensómetros e termómetros eléctricos de resistência nos tubos que constituem as almas. A Figura 6 exemplifica uma secção transversal do tabuleiro instrumentada com extensómetros.

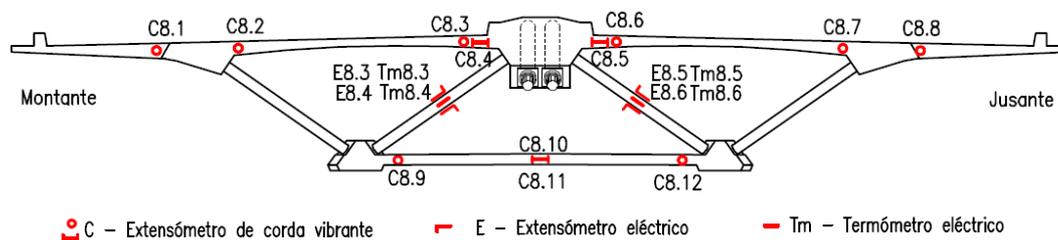


Figura 6 – Secção instrumentada (S8)

Foram também instalados sensores magnetostrictivos para a medição da largura das juntas de dilatação e clinómetros eléctricos na base e no topo do mastro, para além de diversas bases de clinómetro ao longo do tabuleiro. Para estudar o comportamento diferido do betão *in situ* foram executados 39 provetes compensadores termo-higrométricos e de fluência, 27 dos quais foram mantidos em obra e os restantes em laboratório.

A aquisição das leituras foi efectuada de forma automática através de unidades de *data logger*.

Para a realização dos ensaios de carga, além de se utilizarem os aparelhos previamente instalados na obra de arte, ainda foram montados equipamentos adicionais. Com efeito, para a medição dos deslocamentos verticais foi instalado um sistema de nivelamento hidrostático associado a células de pressão e uma estação total que permitiam a sua medição nas secções de meio vão e quarto de vão do tramo central, para além de doze deflectómetros registadores nos tramos laterais. Para a medição dos deslocamentos horizontais do mastro foi instalada uma segunda estação total. A medição das extensões foi complementada através de extensómetros eléctricos instalados na superfície do betão de uma secção do tabuleiro. Finalmente, a medição da força instalada nos tirantes foi efectuada pelo método da vibração [2],[3], tendo-se utilizado acelerómetros uniaxiais piezoeléctricos.

Apresenta-se na Figura 9 a disposição do equipamento utilizado durante os ensaios estáticos.

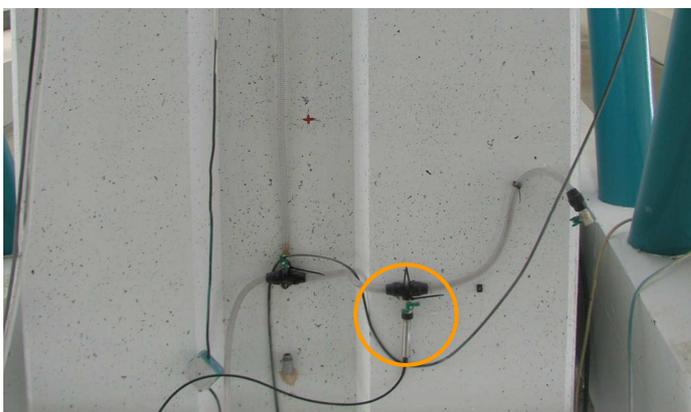


Figura 7 – Célula de pressão no mastro



Figura 8 – Estação total

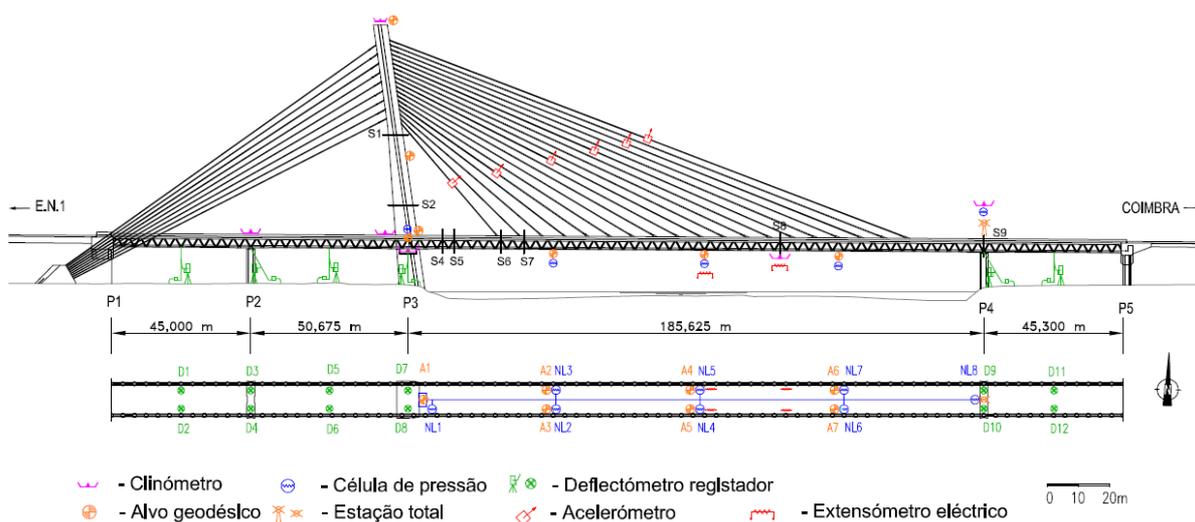
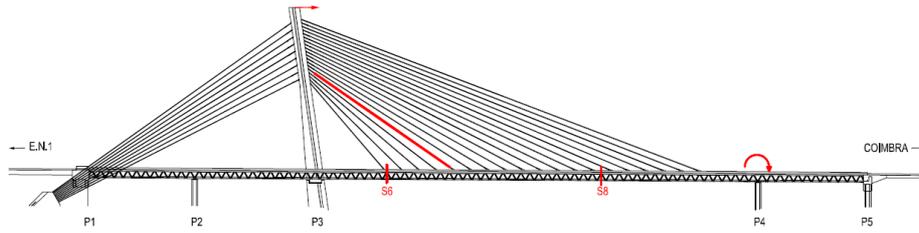


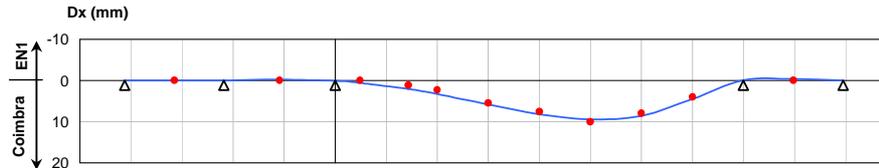
Figura 9 – Plano geral de instrumentação durante os ensaios estáticos

Apresentação dos resultados obtidos

Os ensaios estáticos realizados com a carga concentrada permitiram obter experimentalmente as linhas de influência das diversas grandezas medidas. Na Figura 10 são apresentadas as linhas de influência de várias grandezas determinadas experimentalmente durante os ensaios, bem como as calculadas através do modelo numérico.



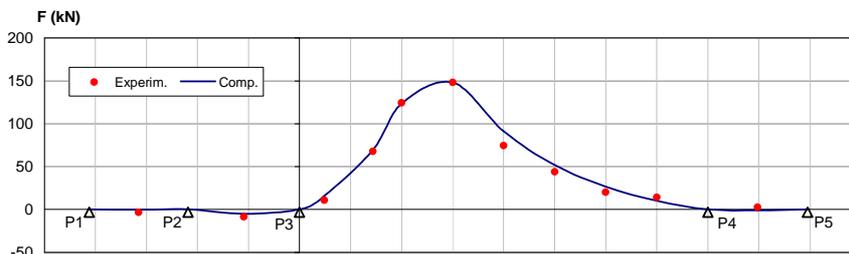
a) Deslocamento horizontal do topo do mastro



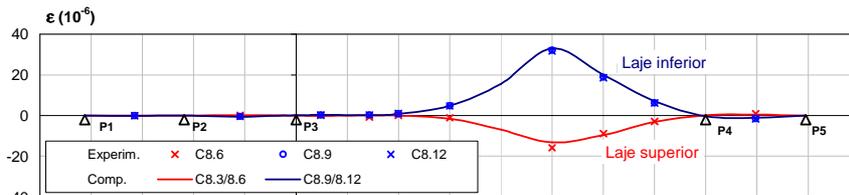
b) Rotação longitudinal no topo do pilar P4



c) Variação da força instalada no tirante 5



d) Extensão do betão na secção S8



e) Extensão do tubo metálico da secção S6

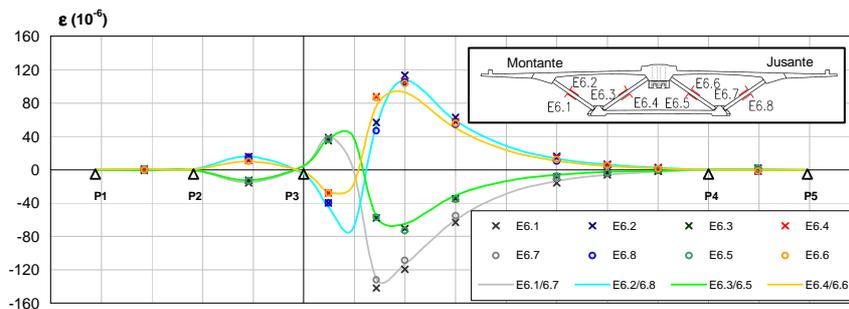
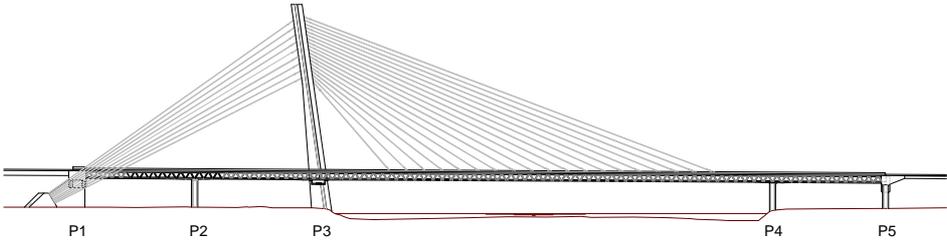
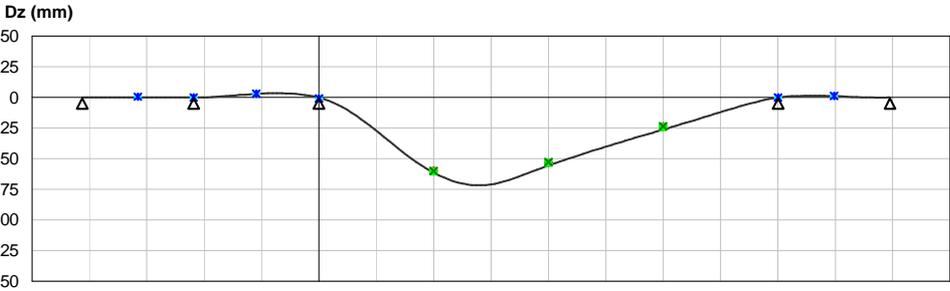


Figura 10 – Linhas de influência experimentais e calculadas

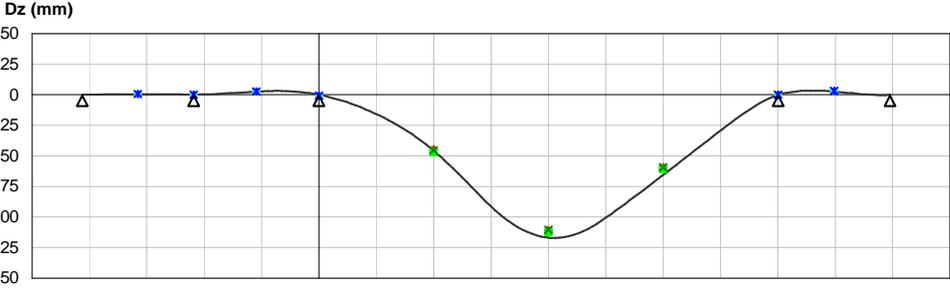
Os ensaios estáticos realizados com a carga distribuída permitiram, naturalmente, obter os maiores valores das diversas grandezas observadas. A título exemplificativo apresentam-se na Figura 11 os deslocamentos verticais medidos no tabuleiro quando o comboio de cargas se encontrava sobre o tramo suspenso (posições de carga 3 a 5).



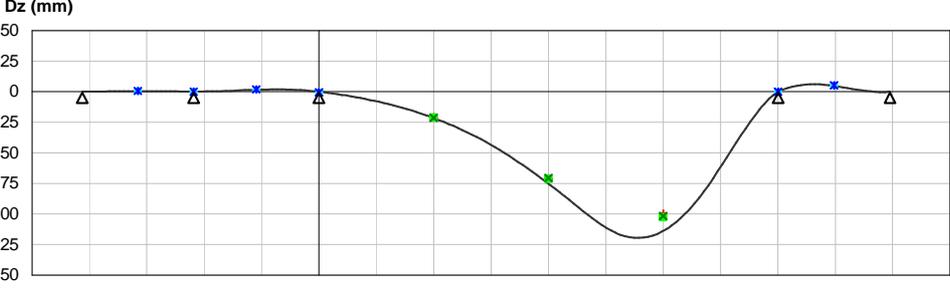
Posição de carga 3



Posição de carga 4



Posição de carga 5



● Niv.Hidr.(Mont) + Niv.Hidr.(Jus) ■ Geod.(Mont) × Geod.(Jus) — Calculado

Figura 11 – Deformação do tabuleiro com o comboio de cargas no tramo suspenso

A análise dos gráficos incluídos nesta figura evidencia a boa concordância existente entre os valores dos deslocamentos verticais medidos durante os ensaios pelos dois métodos utilizados, bem como entre os valores experimentais e os obtidos por via numérica. Esta boa concordância estendeu-se à generalidade dos valores observados.

ENSAIOS DINÂMICOS

Ensaio realizado

Os ensaios dinâmicos tiveram como principal objectivo a identificação das características dinâmicas globais da estrutura, nomeadamente, as frequências, configurações e amortecimentos dos seus modos naturais de vibração.

Foram efectuados onze ensaios de medição de acelerações induzidas pelas acções ambientais, essencialmente pelo vento, durante os quais foram utilizados 15 acelerómetros *Kinematics Uniaxial Episensor* (ES-U), 5 unidades de alimentação e condicionamento de sinal e um sistema de aquisição da *National Instruments* (Figura 12). Em cada ensaio foram registadas acelerações em 15 pontos, dos quais 6 pontos foram fixos para servirem de referência (4 para as componentes verticais e 2 para as componentes transversais). No total foram medidas acelerações em 68 pontos localizados em 34 secções do tabuleiro da ponte e também em 2 pontos no topo do mastro, tal como se apresenta de forma esquemática na Figura 13. Nesta figura estão assinaladas as duas secções onde foram colocados os aparelhos de referência.

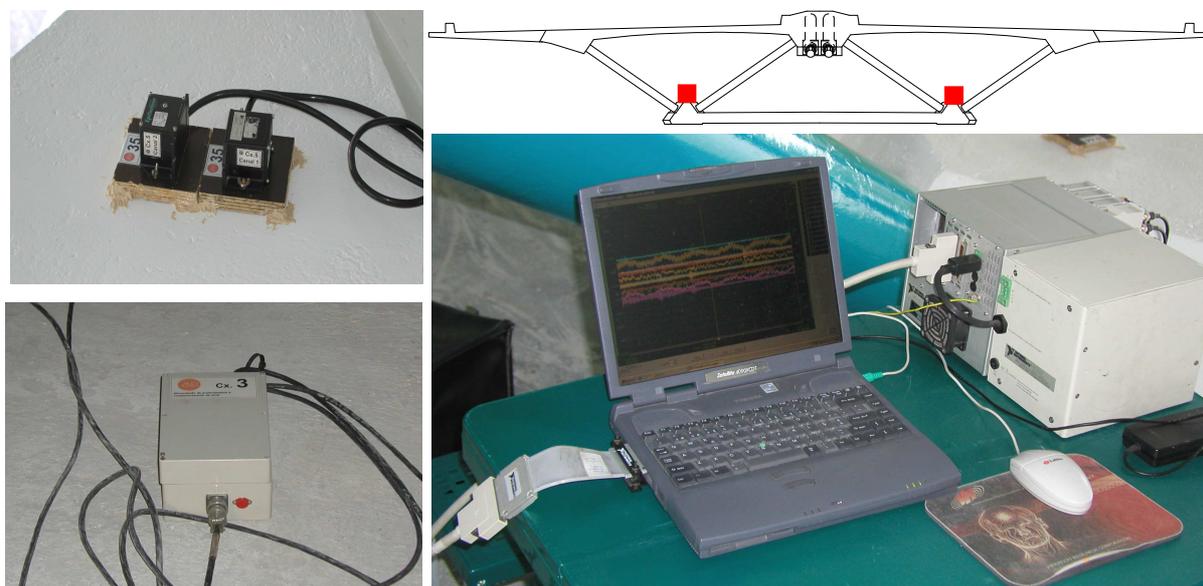


Figura 12 – Equipamento utilizado durante os ensaios dinâmicos

A frequência de amostragem utilizada nos ensaios foi de 1000 Hz, procedendo-se posteriormente ao tratamento digital dos registos assim obtidos. Em cada ensaio obtiveram-se registos com uma duração total de 55 minutos.

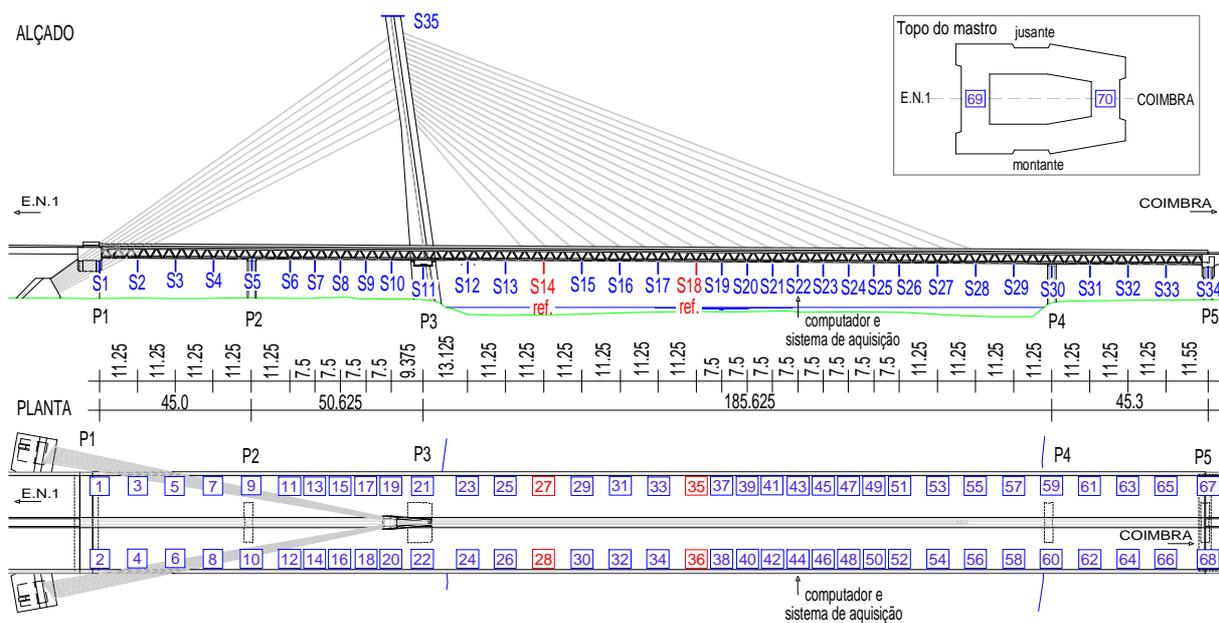


Figura 13 – Secções instrumentadas nos ensaios dinâmicos

Identificação das características dinâmicas

Os registos de aceleração obtidos nos ensaios foram objecto de um pré-processamento que consistiu nas seguintes operações:

- Remoção das componentes contínuas ou de tendências lineares;
- Filtragem passa-baixo com um filtro *Butterworth* de ordem 8 com uma frequência de corte de 8 Hz;
- Decimação dos registos, da frequência de 1000 Hz com que foram adquiridos nos ensaios para uma frequência de 20 Hz.

A identificação das características dinâmicas foi realizada de forma separada para os registos verticais, transversais e longitudinais obtidos ao longo do tabuleiro. Para analisar a interacção entre o mastro e o tabuleiro, as acelerações longitudinal e transversal registadas no topo do mastro foram incluídas na análise dos modos verticais e transversais do tabuleiro, respectivamente.

Para a identificação das frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos modos de vibração dos tabuleiros, foi utilizado o método aperfeiçoado de decomposição no domínio da frequência (EFDD) [6] implementado no programa *ARTEMIS – Output-only modal identification* [8]. Para a aplicação do método EFDD foram estimadas as funções de densidade espectral dos registos de acelerações, considerando amostras com 1024 valores o que, para a frequência de amostragem de 20Hz, corresponde a uma resolução em frequência de 0,020 Hz nas estimativas das funções de densidade espectral. As matrizes das funções de densidade espectral foram decompostas em valores e vectores singulares tendo-se obtido os espectros de valores singulares que permitiram a identificação de 16 modos naturais de vibração da estrutura. Na Figura 14 apresentam-se os espectros de valores singulares para os registos verticais no tabuleiro e longitudinal no topo do mastro.

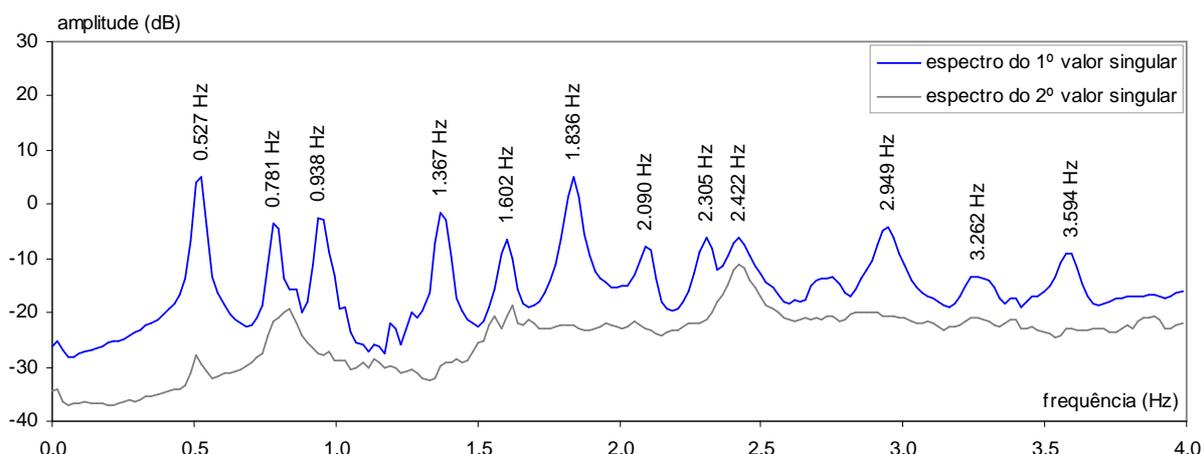


Figura 14 – Espectros de valores singulares para os registos verticais no tabuleiro e longitudinal no topo do mastro

A frequência do primeiro modo de vibração vertical do tabuleiro identificado foi de 0,520 Hz, do primeiro modo de torção foi de 0,788 Hz do primeiro modo de vibração transversal foi de 1,425 Hz. Nas figuras 15 a 21 apresenta-se as configurações identificadas e calculadas dos principais modos de vibração, indicando-se também as respectivas frequências e coeficientes de amortecimento.

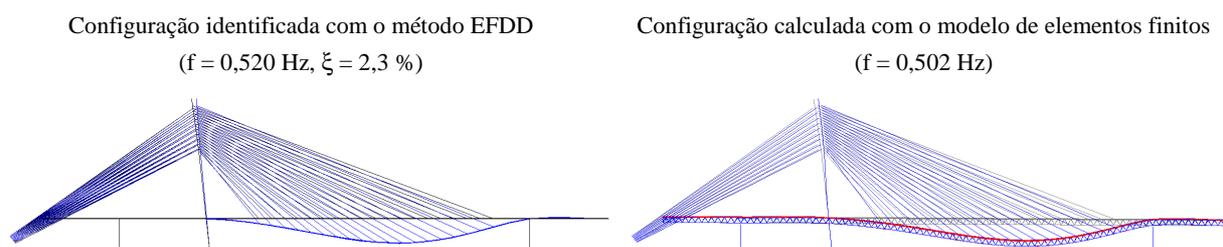


Figura 15 – Configuração do 1º modo de vibração vertical

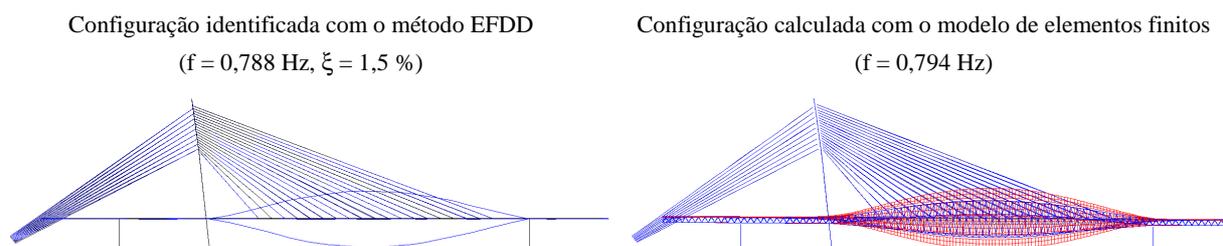


Figura 16 – Configuração do 1º modo de vibração de torção

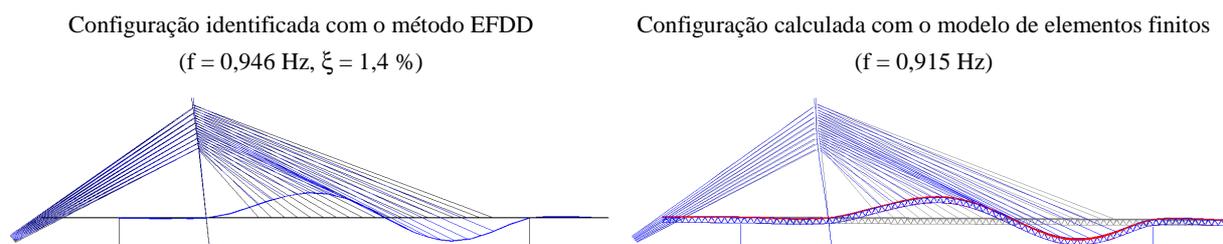
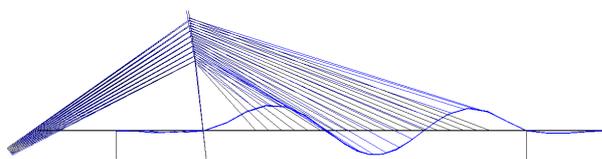


Figura 17 – Configuração do 2º modo de vibração vertical

Configuração identificada com o método EFDD

($f = 1,373 \text{ Hz}$, $\xi = 1,0 \%$)



Configuração calculada com o modelo de elementos finitos

($f = 1,327 \text{ Hz}$)

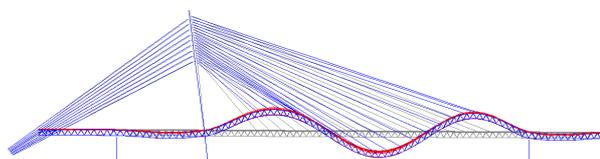
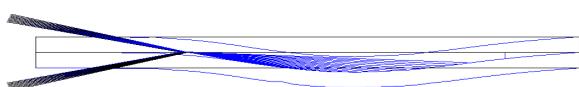


Figura 18 – Configuração do 3º modo de vibração vertical

Configuração identificada com o método EFDD

($f = 1,425 \text{ Hz}$, $\xi = 2,5 \%$)



Configuração calculada com o modelo de elementos finitos

($f = 1,409 \text{ Hz}$)

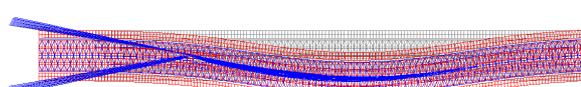
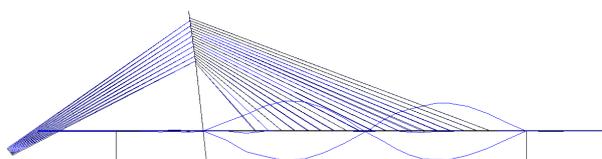


Figura 19 – Configuração do 1º modo de vibração transversal do tabuleiro

Configuração identificada com o método EFDD

($f = 1,600 \text{ Hz}$, $\xi = 0,9 \%$)



Configuração calculada com o modelo de elementos finitos

($f = 1,597 \text{ Hz}$)

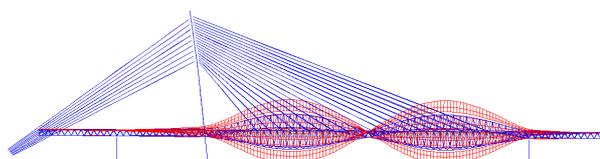
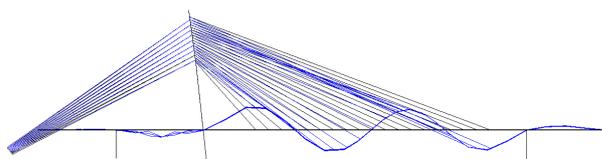


Figura 20 – Configuração do 2º modo de torção

Configuração identificada com o método EFDD

($f = 1,835 \text{ Hz}$, $\xi = 0,7 \%$)



Configuração calculada com o modelo de elementos finitos

($f = 1,769 \text{ Hz}$)

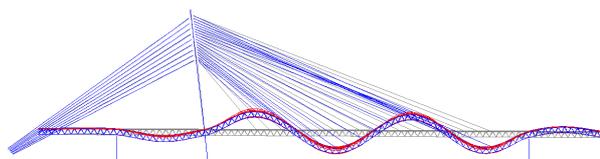


Figura 21 – Configuração do 4º modo de vibração vertical

CONCLUSÕES

A ponte Rainha Santa Isabel foi submetida a ensaios estáticos e dinâmicos que foram realizados no final da construção e antecedendo a abertura ao tráfego.

Durante os ensaios estáticos, o sistema de monitorização estrutural existente, juntamente com o equipamento complementar montado especificamente para os ensaios permitiram a medição de deslocamentos verticais do tabuleiro, deslocamentos horizontal do mastro, rotações em diversos pontos da estrutura, extensões e temperaturas nos elementos de betão e nas treliças metálicas, bem como das forças instaladas nos tirantes. Nestes ensaios foram utilizados dezasseis camiões carregados com um peso total de 4 761 kN, tendo-se considerado um total de 27 casos de carga.

A utilização de diferentes tipos de sensores permitiu a validação dos resultados experimentais. O grande número de sensores utilizados, mais de 200, garante a fiabilidade dos valores medidos. A coerência destes valores é particularmente evidente nos deslocamentos verticais do tabuleiro, medido nos mesmos pontos por um sistema de nivelamento hidrostático e por uma estação total.

A avaliação das características dinâmicas da ponte foi efectuada através de ensaios de medição de vibrações ambientais. A análise da informação experimental assim obtida foi realizada através da aplicação de um método de identificação modal estocástica. Estes procedimentos revelaram ser adequados, permitindo identificar um número significativo de modos de vibração.

Os resultados experimentais adquiridos durante os ensaios foram utilizados para validar o modelo numérico desenvolvido e para a avaliação do comportamento estrutural da ponte. Em geral, as diferenças entre os valores medidos e calculados foram inferiores a 5%. A calibração do modelo estrutural foi uma mais-valia significativa da realização dos testes, uma vez que possibilita a sua utilização para a interpretação futura do comportamento desta obra.

REFERÊNCIAS

- [1] CSI – SAP2000 – *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, 2000.
- [2] Robert, J.; Bruhat, D.; Gervais, J. – “Mesure de la Tension des Câbles par le Méthode Vibratoire”, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 173, Paris, pp. 109-114, 1991.
- [3] Casas, Juan – “A Combined Method for Measuring Cable Forces: The Cable-Stayed Alamillo Bridge”, *Structural Engineering International*, IABSE, Vol. 4, No 4, pp. 235-240, 1996.
- [4] Hirachan, J.; Chajes, M. – “Experimental influence lines for bridge evaluation”, *Bridges Structures*, Vol. I, No 4, pp. 405-412, Taylor & Francis, December 2005.
- [5] Institution of Civil Engineering – *Supplementary load testing of bridges*, Thomas Telford Publications, London, 1998.
- [6] Rodrigues, J. – *Identificação Modal Estocástica. Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*, Dissertação de doutoramento, FEUP, Porto, 2004.
- [7] National Instrument – *LabView Professional Development System, version 8.2*, 2006.
- [8] Structural Vibration Solutions – *ARTEMIS Extractor Pro*, Release 3.5, Denmark, 2005.