

## **Caracterização do Comportamento *in situ* da Ponte sobre o rio Mondego na A17**

**Xu Min**

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

**Luís Oliveira Santos**

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

### **RESUMO**

Apresenta-se o trabalho desenvolvido no âmbito dos ensaios de carga da Ponte sobre o rio Mondego, realizados no final da sua construção. Para além de uma descrição geral da estrutura e dos procedimentos adoptados durante os ensaios estáticos e dinâmicos, são apresentados alguns dos principais resultados obtidos, estabelecendo-se o confronto entre os valores medidos e calculados.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Comportamento *in situ*, ensaios estáticos e dinâmicos, modelo de elementos finitos, linha de influência

### **1. INTRODUÇÃO**

A realização de ensaios de carga no final da construção 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 detecção precoce de eventuais deficiências estruturais e a caracterização do seu estado inicial, que poderá ser utilizado como uma referência ao longo da sua vida.

Neste contexto foram realizados os ensaios de carga da Ponte sobre o rio Mondego, obra de arte inserida na auto-estrada A17. Os ensaios estáticos visaram o estudo do comportamento estrutural da obra de arte sob a acção de sobrecargas significativas, posicionadas de forma a avaliar o seu desempenho sem provocar fendilhação precoce. Os ensaios dinâmicos tiveram como objectivo a avaliação experimental das frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos principais modos de vibração da estrutura.

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.

## 2. DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE

A Ponte sobre o rio Mondego é uma estrutura de betão armado pré-esforçado, constituída por dois tabuleiros independentes, um para cada sentido de tráfego, contínuos em toda a sua extensão. Trata-se de uma obra de arte que possui um comprimento total de 1 016,1 m, que, em planta, se insere, de sul para norte, numa curva circular esquerda com 900 m de raio, seguida de uma clotoide esquerda e de um alinhamento recto [1]. Os tabuleiros são idênticos entre si, possuindo individualmente uma plataforma de 18,10 m. Na Figura 1 apresenta-se uma vista geral da estrutura.



Figura 1 – Vista geral da ponte sobre o rio Mondego

Constituída pela ponte propriamente dita e pelo viaduto de acesso, a estrutura da obra de arte apresenta duas soluções distintas.

O viaduto de acesso é formado por dez tramos, com vão extremo de 32,0 m e vão corrente de 41,5 m. A secção transversal dos tabuleiros é constituída por duas vigas longitudinais, com uma altura de 3,40 m, ligadas por uma laje de espessura variável que se prolonga em consolas laterais. Em cada secção de apoio existem dois pilares/estaca.

A ponte propriamente dita compreende seis tramos, delimitados pelo pilar de transição (pilar P10) e o encontro Norte. O primeiro vão vence um vão de 56,6 m, os segundo e terceiro possuem 100,0 m de comprimento, seguem-se dois vãos de 135,0 m sobre o rio Mondego e um vão extremo de 84,0 m. O tabuleiro é formado por um caixão unicelular, cuja altura varia entre 3,40 m e 8,20 m. Nas secções sobre os pilares e encontros, os tabuleiros dispõem de carlingas. Os pilares dão continuidade às estacas de fundação, que, em cada tabuleiro, são duas nos pilares P10 e quatro nos P11 a P14. Neste caso, cada duas estacas são ligadas transversalmente por uma parede de betão de espessura variável. Os pilares P15 são constituídos por duas paredes semelhantes às dos pilares P13 e P14, embora a sua fundação seja directa, realizada através de sapatas [1].

## 3. MODELO NUMÉRICO

O comportamento estrutural da Ponte foi analisado através de um modelo numérico tridimensional, tendo-se recorrido ao programa SAP2000 [2]. A definição deste modelo foi efectuada com base nas características físicas e geométricas definidas no projecto [1].

O tabuleiro foi modelado através de elementos finitos de casca e de barra. A ligação entre os elementos de barra e os de casca foi realizada através de “*Body Constraint*”. Os pilares/estaca foram modelados através de elementos finitos de barra e considerados perfeitamente encastrados na base. Os aparelhos de apoio, que suportam o tabuleiro nos pilares e nos encontros, foram modelados através de elementos de ligação lineares.

Na Figura 2 representa-se um pormenor do modelo de uma aduela em caixão e de um pilar da ponte.

#### 4. ENSAIOS ESTÁTICOS

##### 4.1 Ensaios realizados

Os ensaios efectuados incidiram sobre o tabuleiro destinado ao tráfego ascendente, tendo sido ensaiados os tramos do viaduto de acesso compreendidos entre os pilares P3 e P7 e todos os tramos da ponte, compreendidos entre os pilares P10 e o encontro Norte. O presente trabalho incide apenas sobre os ensaios realizados na ponte propriamente dita, que pela sua relevância foram sujeitos a ensaios mais sofisticados, com equipamento mais diversificado.

Os ensaios foram realizados em duas fases distintas: na primeira fase foi utilizada uma carga concentrada para determinar linhas de influência das várias grandezas; na segunda fase recorreu-se a uma sobrecarga distribuída.

A carga concentrada foi constituída por quatro camiões, perfazendo uma carga total de 1 206 kN. Inicialmente a carga concentrada foi posicionada na generalidade das secções de meio vão e de quarto de vão dos tramos ensaiados, num total de 16 casos de carga. Posteriormente, esta carga foi utilizada como carga rolante, circulando de forma muito lenta, ao longo do tabuleiro, permitindo efectuar o registo contínuo das diversas grandezas observadas. Este é uma forma eficiente para determinar linhas de influência das grandezas observadas, numa forma contínua, embora a carga utilizada não seja unitária [3].

A carga distribuída é constituída por dezasseis camiões carregados, com um peso total de 4 847 kN. Divididos em quatro grupos, os camiões foram colocados em linhas perpendiculares ao eixo da ponte, induzindo significativos momentos flectores nas secções de meio vão dos tramos ensaiados bem como nas secções de apoio sobre os pilares.

Os maiores momentos flectores positivos nas secções de meio vão foram obtidos com três linhas de camiões que foram sucessivamente colocadas sobre cada um dos tramos ensaiados. Na Figura 3 apresenta-se uma vista geral do comboio de cargas numa destas posições. Os maiores momentos flectores negativos nas secções de apoio foram induzidos através do carregamento simultâneo dos dois tramos adjacentes ao apoio, dispendo-se em cada tramo dois grupos de camiões (Figura 4).

##### 4.2 Instrumentação

No ensaio da ponte foram utilizados diversos tipos de equipamento que permitiram a medição de deslocamentos verticais e rotações, longitudinais e transversais, em diversas secções do tabuleiro. Foi também controlada a evolução da temperatura ambiente no exterior e no interior do caixão.

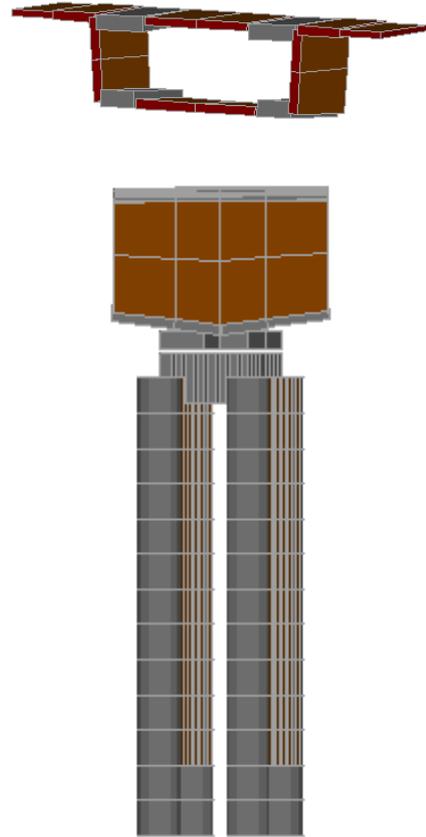


Figura 2 – Pormenor do modelo do tabuleiro em caixão e de pilar



Figura 3 – Carregamento individual dos tramos



Figura 4 – Carregamento de dois tramos consecutivos

A medição dos deslocamentos verticais nas secções de meio vão e de quarto de vão nos tramos compreendidos entre os pilares P13 e P15, foi efectuada através de um sistema de nivelamento hidrostático, associado a células de pressão (Figura 5). O circuito incluía ainda uma célula de pressão no topo dos pilares P14 e P15, local considerado fixo. Neste sistema os deslocamentos verticais são determinados através das variações de pressão nas células. Nos outros tramos os deslocamentos verticais foram medidos através de deflectómetros registadores, que permitem a medição de deslocamentos com uma precisão de 0,2 mm (Figura 6).



Figura 5 – Célula de pressão



Figura 6 – Deflectómetro registador

A medição de rotações longitudinais e transversais foi efectuada através de seis clinómetros eléctricos, colocados no topo dos pilares P13 e P14, bem como nas secções de quarto de vão adjacentes a estes pilares.

A aquisição das leituras efectuadas pelas células de pressão do sistema de nivelamento hidrostático e pelos clinómetros eléctricos foi efectuada através de três *datalogger Datatakker DT515*, permitindo a centralização destas medições num computador portátil. Durante a passagem da carga rolante a aquisição dos dados foi efectuada com uma frequência de 1 Hz.

#### 4.3 Resultados obtidos

Os ensaios realizados geraram um volume considerável de informação, pelo que do conjunto dos resultados obtidos apresenta-se apenas uma parte, seleccionados de modo a formar uma amostra representativa das diversas grandezas observadas.

Na Figura 7 apresentam-se as diversas linhas de influência obtidas através do posicionamento sucessivo ao longo do tabuleiro da carga concentrada, bem como da sua utilização como carga rolante. Nos gráficos desta figura, os valores medidos durante as

posições de carga têm, naturalmente, um carácter discreto, ao contrário dos obtidos através da passagem da carga rolante que têm um carácter contínuo. Para além dos valores experimentais, está representada a linha de influência calculada através do modelo numérico, tendo-se em conta a carga aplicada. Esta figura, para além da boa concordância entre os valores experimentais e calculados, evidencia também uma notável correlação entre os valores medidos durante as diversas posições de carga e a passagem da carga rolante.

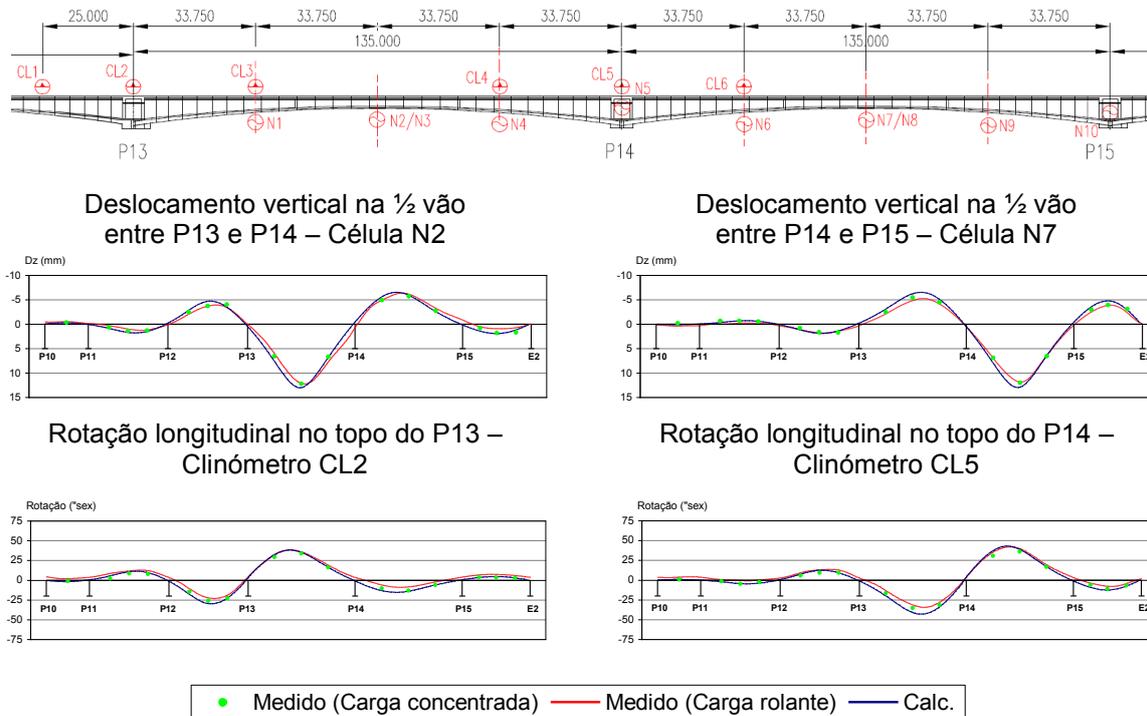


Figura 7 – Linhas de influência □

A utilização do comboio de carga induziu esforços e deformações muito significativas na estrutura. Os maiores deslocamentos obtiveram-se nos tramos com vão de 135 m, quando 12 camiões se encontravam num destes tramos. Os deslocamentos observados nos dois tramos foram muito semelhantes, que nas secções a meio vão variam-se entre 34,7 mm e 35,8 mm. Nos casos em que a carga distribuída foi colocada em dois tramos consecutivos, os deslocamentos foram mais pequenos. Na Figura 8 apresentam-se os deslocamentos verticais medidos no tabuleiro enquanto sujeito aos diferentes carregamentos, incluindo também as deformações do tabuleiro calculadas. Em todos os casos é evidente a boa correlação entre os valores medidos e calculados.

## 5. ENSAIOS DINÂMICOS

### 5.1 Ensaios realizados

Os ensaios dinâmicos da Ponte sobre o rio Mondego incidiram sobre o tabuleiro em caixão, compreendido entre o pilar de transição (P10) e o encontro Norte. Foram efectuados sete ensaios de medição de acelerações induzidas pelas acções ambientais, essencialmente pelo vento. Foram utilizados 15 acelerómetros, dos quais três foram colocados numa secção escolhida como referência permanecendo sempre nessa secção,

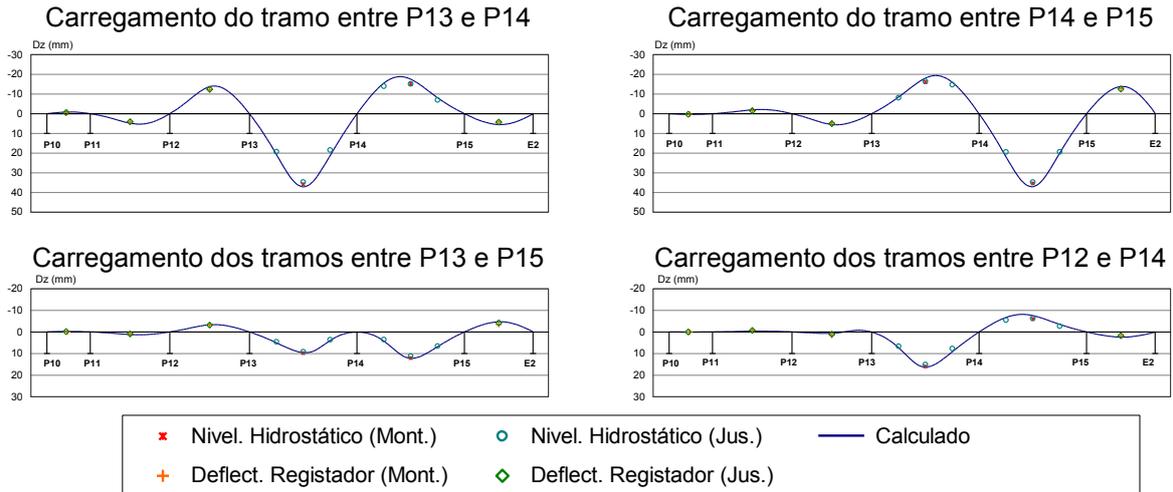


Figura 8 – Deformação do tabuleiro

enquanto os restantes foram sendo colocados em diversas secções ao longo dos seis tramos. No total foram registadas acelerações em 25 secções (Figura 9).

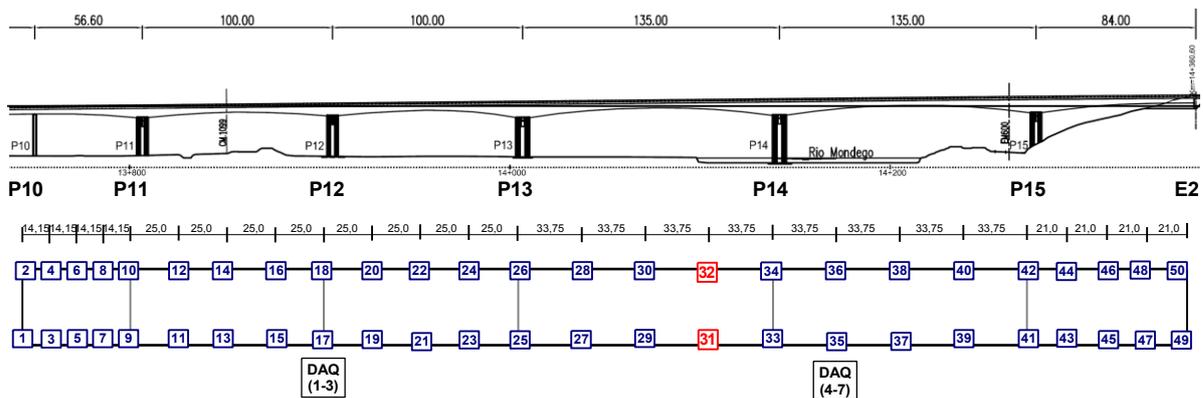


Figura 9 – Pontos instrumentados nos ensaios dinâmicos

A frequência de amostragem utilizada nos ensaios foi de 500 Hz, procedendo-se posteriormente ao tratamento digital dos registos assim obtidos. Em cada ensaio obtiveram-se registos com uma duração cerca de 45 minutos.

## 5.2 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 4 Hz;
- Decimação dos registos, da frequência de 500 Hz com que foram adquiridos nos ensaios para uma frequência de 10 Hz.

O pré-processamento foi efectuado através do programa *LabView* [11].

Para a identificação das frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos modos de vibração do tabuleiro, foi utilizado o método aperfeiçoado de decomposição no domínio da frequência (EFDD), implementado no programa *ARTEMIS – Output-only modal identification*. Para a aplicação do método EFDD foram estimadas as funções de densidade espectral dos registos de acelerações, cujas matrizes foram decompostas em valores e vectores singulares (Figura 10).

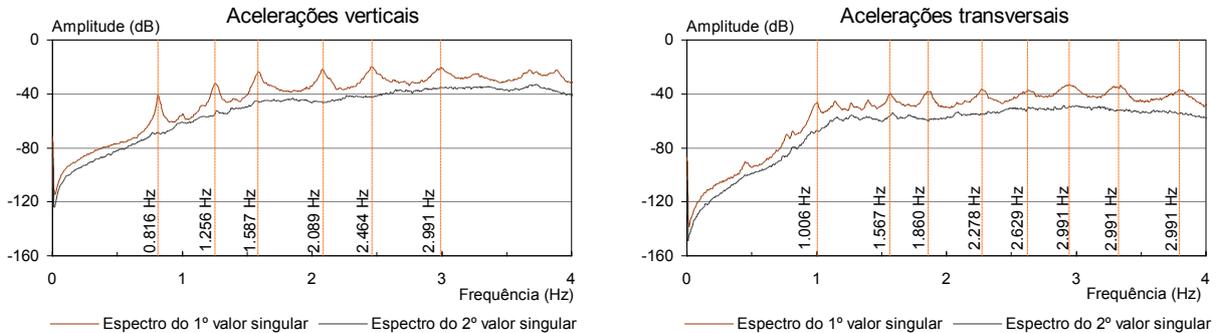


Figura 10 – Espectros de valores singulares da matriz de funções de densidade espectral

A identificação das características dinâmicas foi realizada de modo separado para as acelerações verticais e transversais. Analisando os espectros de valores singulares e as configurações correspondentes aos seus picos de ressonância, foram identificados 6 modos de vibração verticais e 8 modos de vibração transversais. As frequências dos modos identificados estão assinaladas nos respectivos espectros apresentados na Figura 10.

Na Figura 11 e Figura 12 estão a apresentar as configurações e respectivos valores de frequência e coeficiente de amortecimento dos primeiros três modos de vibração, verticais e transversais, identificados com a técnica EFDD. Nas mesmas figuras estão também incluídos os modos de vibração correspondentes obtidos através do modelo de cálculo.

## 6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação descreveram-se os procedimentos seguidos durante os ensaios estáticos e dinâmicos efectuados na Ponte sobre o rio Mondego e apresentaram-se alguns dos resultados obtidos.

Foi desenvolvido um modelo tridimensional de elementos finitos, tendo-se obtido uma boa concordância entre os valores medidos e calculados, tanto no que se refere aos ensaios estáticos como aos ensaios dinâmicos. O modelo numérico calibrado constitui uma mais-valia significativa da realização dos ensaios, uma vez que possibilita a sua utilização para a interpretação futura do comportamento desta obra.

Em termo de realização de ensaio, a boa correlação entre as linhas de influência obtidas através do registo contínuo do nivelamento hidrostático e clinómetros eléctricos durante a passagem lenta de cargas de ensaio com as calculadas confirmou, mais uma vez, a fiabilidade desta técnica.

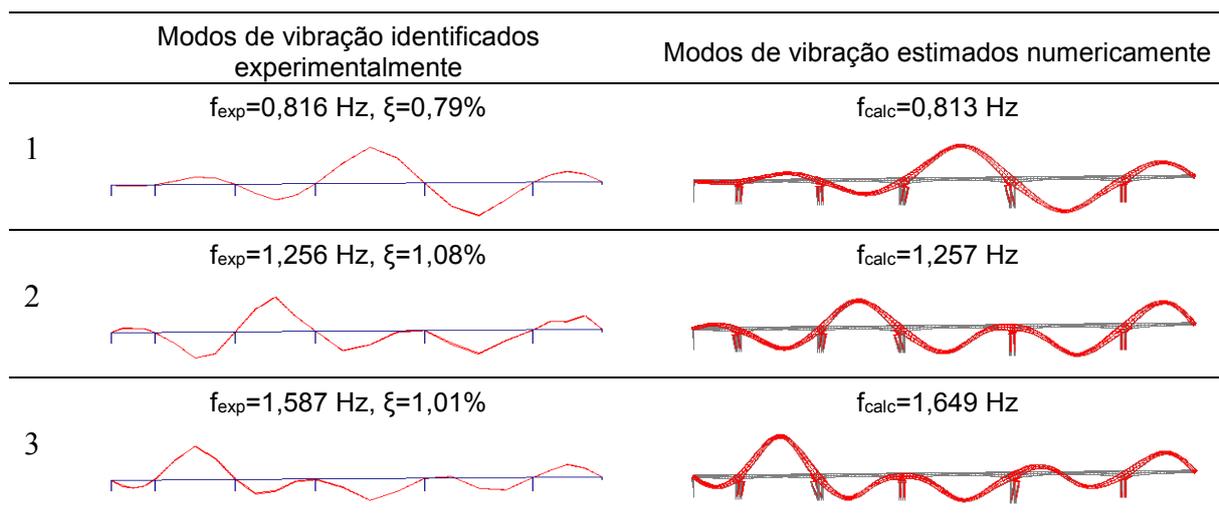


Figura 11 – Configuração dos modos de vibração verticais

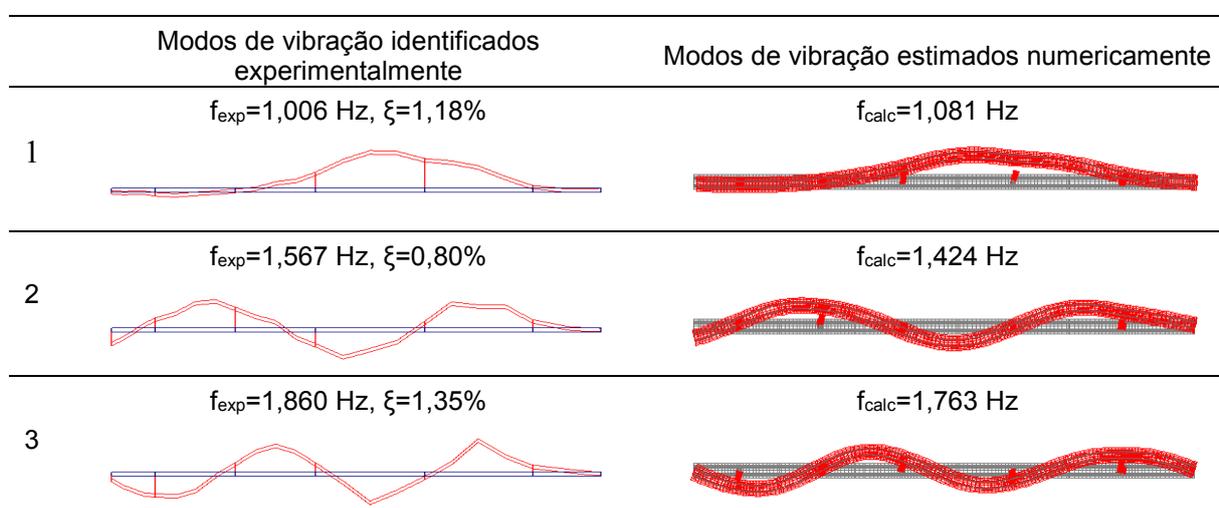


Figura 12 – Configuração dos modos de vibração transversais

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios recebidos por parte do Engº Armando Rito e da LACE – Litoral Atlântico, Construtores ACE para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Armando Rito – *A17 - Auto-estrada Marinha Grande / Mira. Sublanço Louriçal / A14. Ponte sobre o rio Mondego e viaduto de acesso*, Projecto de execução, Janeiro de 2006.
- [2] CSI – SAP2000 – *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, 2000.
- [3] L. Oliveira Santos, M. Xu – *Ensaios de carga do viaduto de Vila Pouca de Aguiar*, ICM2007, pp. 93 – 100, Lisboa, Portugal, 5 de Novembro de 2007.
- [4] Structural Vibration Solutions (SVS) – *ARTEMIS Extractor Pro*, Release 3.2, Denmark, 2005.