

COMPORTAMENTO *IN SITU* OBRAS DE ARTE COM JUNTA BELGA



L. Oliveira Santos
Inv. Principal
LNEC
Lisboa



Xu Min
Inv. Auxiliar
LNEC
Lisboa



Jorge Rodrigues
Inv. Auxiliar
LNEC
Lisboa

SUMÁRIO

A utilização das denominadas juntas belga em obras de arte é uma solução que teve recentemente as suas primeiras aplicações no nosso país. Duas dessas obras foram sujeitas a ensaios estáticos e dinâmicos, cujos principais resultados se divulgam tendo em vista um melhor conhecimento do comportamento estrutural deste tipo de obras.

Palavras-chave: Ensaios *in situ*, junta belga, ensaios dinâmicos, identificação modal.

1. INTRODUÇÃO

A “junta belga” é uma forma de ligação de tramos constituídos por vigas pré-fabricadas. Nesta solução a continuidade é assegurada apenas pela laje que, na zona da junta, tem uma espessura reduzida. Evita-se assim a continuidade das vigas através de uma junta vertical, pré-enchida com poliestireno expandido, que permite a rotação livre das extremidades [1],[2].

A utilização deste tipo juntas em Portugal remonta aos anos 70, com a construção das pontes de Sinhel, Amioso e Mega, projectadas pelo Eng^o Armando Rito. No início dos anos 80, o Prof. Lobo Fialho recorreu novamente a este conceito no projecto das pontes sobre o rio Côa, de Barcelos sobre o Cavado e da Raiva sobre o Mondego. Contudo, e embora a sua utilização seja corrente noutros países, só recentemente as juntas belgas voltaram a ser utilizadas em Portugal.

Neste trabalho pretende-se contribuir para um melhor conhecimento do comportamento estrutural deste tipo de obras através da divulgação dos resultados obtidos no decurso dos ensaios estáticos e dinâmicos realizados em duas dessas obras, ambas integradas na auto-estrada A24, foram sujeitas a ensaios de carga no final da construção.

2. DESCRIÇÃO DAS OBRAS DE ARTE

2.1 Passagem Superior 102

A Passagem Superior 102 é uma estrutura de betão armado pré-esforçado, com dois tramos de 24 m e 22 m de vão, que se apoiam nos encontros e num pórtico transversal (Figura 1).



Figura 1: Vista geral da Passagem Superior 102

O tabuleiro possui uma secção transversal com uma largura de 10,40 m constituída por uma laje vigada de betão armado, com quatro vigas "I" pré-fabricadas em betão armado pré-esforçado, com 1,24 m de altura, cujos eixos distam 3,00 m entre si. A laje tem uma espessura total de 0,25 m. A solidarização das vigas é garantida pela laje e pelas carlingas em betão armado existentes nas secções de apoio.

A ligação dos dois tramos foi efectuada através de uma "junta belga" (Figura 2), sendo a continuidade apenas assegurada pela laje que, na zona da junta, tem uma espessura reduzida de 0,12 m.

O pórtico transversal é constituído por uma travessa e três pilares, betonados *in situ*, com cerca de 5,40 m de altura e uma secção rectangular de 0,60 x 0,90 m². Os encontros são do tipo perdido, betonados *in situ*. As suas fundações, tal como as dos pilares, são directas, realizadas através de uma sapata contínua.



Figura 2: Diferentes vistas da junta belga (PS 102)

O apoio do tabuleiro no pórtico transversal e nos encontros efectua-se através de aparelhos de apoio de neoprene cintado. No pórtico transversal existem duas linhas de aparelhos de apoio, uma para cada conjunto de vigas pré-fabricadas.

2.2. Ponte sobre o rio Felgueiras

A ponte sobre o rio Felgueiras é uma estrutura de betão armado pré-esforçado, constituída por dois tabuleiros independentes, um para cada sentido de tráfego, e que, segundo o eixo longitudinal da obra de arte, tem uma extensão total de 125 m, que se divide em cinco tramos com 25 m de vão (Figura 3). A ponte possui um viés de 70 gradus, ângulo que se verifica também na intersecção entre os eixos de apoio e a directriz. A continuidade estrutural dos tramos é assegurada através de “juntas belgas”.



Figura 3: Vista geral da Ponte sobre o rio Felgueiras

Cada tabuleiro tem uma largura de 13,21 m e é constituído por seis vigas “I” pré-fabricadas e pré-esforçadas, com uma altura de 1,20 m, afastadas entre si de 2,23 m. Sobre as vigas foram colocadas pré-lajes em betão armado com 0,06 m de espessura que permitiram a betonagem *in situ* da laje, cuja espessura total varia entre 0,20 m e 0,27 m.

Os pilares têm uma secção transversal rectangular oca (4,00 m × 1,50 m). No topo dos pilares existe um capitel pré-esforçado, com uma largura de 12,00 m, sobre o qual se apoiam as vigas. Os encontros são do tipo perdido.

O apoio das vigas longitudinais do tabuleiro nos pórticos transversais e nos encontros realiza-se através de aparelhos de apoio em neoprene cintado.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

2.1 Passagem Superior 102

O comportamento estrutural da Passagem Superior 102 foi analisado através de um modelo numérico tridimensional, tendo-se recorrido ao programa SAP2000 [6] para simular o

comportamento da estrutura correspondente às diversas situações de ensaio. A definição deste modelo foi efectuada com base nas características físicas e geométricas definidas no projecto.

O modelo implementado é constituído por 469 nós, 232 elementos de casca e 143 elementos de barra que permitiram a modelação da laje, vigas longitudinais, carlingas e pilares. A ligação entre os elementos de casca, utilizados na modelação da laje, e os elementos de barra, que simulam as vigas, foi efectuada através da definição de relações de dependência entre os graus de liberdade dos respectivos nós. Em todo o modelo foi respeitada a posição relativa do centro de gravidade dos elementos de viga e de casca, o que tornou naturalmente mais complexa a modelação desta zona da estrutura.

O aspecto mais particular desta obra de arte é o recurso à junta belga para assegurar a ligação entre os dois tramos, pelo que a avaliação do funcionamento estrutural da obra de arte está intimamente ligada à caracterização do comportamento da junta. A sua modelação foi efectuada mantendo o carácter isostático das vigas longitudinais, sendo a continuidade entre os tramos assegurada apenas pelo troço de laje sobre o pórtico central, com uma extensão de 1,60 m, que foi simulado através de elementos finitos de casca, idênticos aos utilizados na restante laje, mas com apenas 0,12 m de espessura. Na Figura 4 apresentam-se dois pormenores do modelo de cálculo relativos à zona da junta referida.

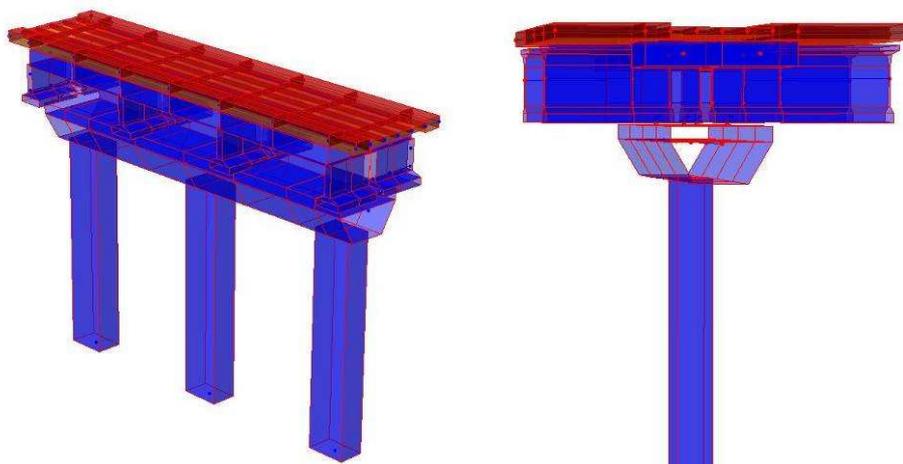


Figura 4: Modelação do apoio das vigas no pórtico central incluindo a junta belga

2.2. Ponte sobre o rio Felgueiras

A modelação do comportamento estrutural da ponte sobre o rio Felgueiras foi efectuada de forma muito semelhante à da PS102, tendo-se utilizado 430 elementos de barra na modelação das vigas, carlingas e pilares. A laje do tabuleiro foi modelada através de 434 elementos de laje, cuja ligação às vigas é assegurada através de relações de dependência entre os graus de liberdade dos respectivos nós. Na Figura 5 apresentam-se duas perspectivas do modelo implementado.

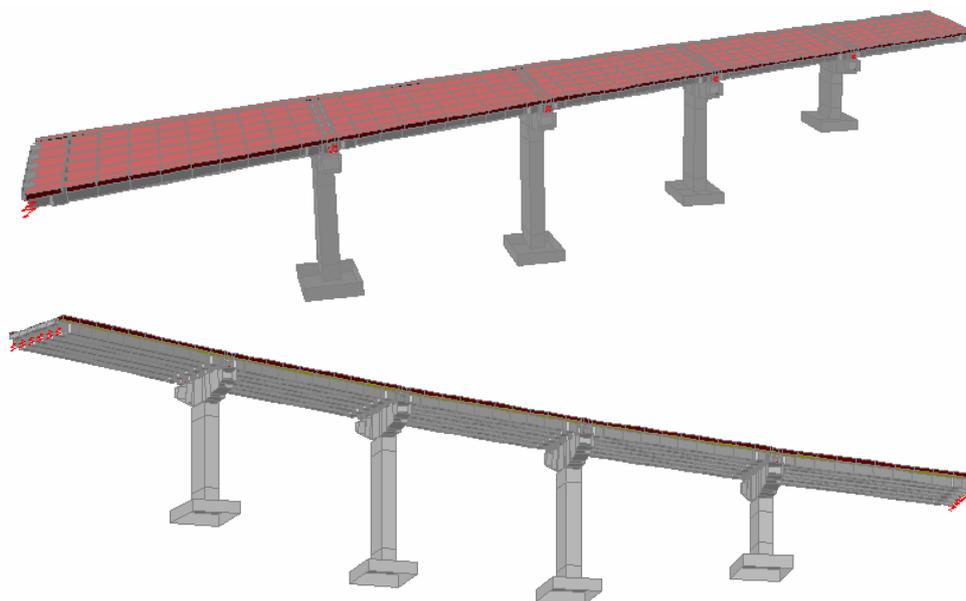


Figura 5: Modelo de análise da ponte sobre o rio Felgueiras

A modelação das juntas belgas que asseguram a ligação dos diversos tramos foi efectuada de forma semelhante à anteriormente descrita para a PS102, sendo que nesta ponte o troço de laje que garante a continuidade tem uma extensão de 1,50 m, e os elementos finitos de casca têm 0,15 m de espessura.

4. ENSAIOS ESTÁTICOS

4.1. Instrumentação utilizada

Os ensaios de carga realizados, para além do estudo global das estruturas ensaiadas, tiveram particular atenção à caracterização experimental do comportamento das “juntas-belgas” quando as estruturas estavam sujeitas a sobrecargas significativas.

O equipamento utilizado foi corrente, tendo-se recorrido a deflectómetros registadores para a medição dos deslocamentos verticais e a clinómetros eléctricos para a medição de rotações. As características específicas deste tipo de estrutura reflectiram-se contudo na disposição deste equipamento.

Com efeito, no intuito de melhor caracterizar experimentalmente a deformada das vigas tendo em vista clarificar o comportamento da ligação realizada através da junta belga, na PS 102, para além de se medirem o deslocamento vertical nas secções de meio vão de todas as vigas, foram ainda colocados deflectómetros registadores nas secções de quarto de vão das vigas interiores do tramo maior. Pretendeu-se desta forma obter alguma redundância na informação recolhida e determinar de forma mais completa a deformada das vigas. Na ponte sobre o rio

Felgueiras, para além de se instrumentarem duas vigas nas diversas secções de meio vão e apoio intermédio, mediram-se todas as secções de meio vão do tramo compreendido entre os pilares P1 e P2. Utilizaram-se assim catorze deflectómetros no ensaio da PS102 e vinte e seis no ensaio da ponte sobre o rio Felgueiras.

Outro aspecto que mereceu particular atenção foi a medição das rotações nas secções de apoio. Com efeito, era expectável que estas rotações reflectissem, de forma acentuada, o comportamento resultante da utilização de juntas belgas, pelo que a sua medição foi efectuada em vigas consecutivas, como se pode observar na Figura 6 e, mais em pormenor, na Figura 7, ambas relativas à ponte sobre o rio Felgueiras.



Figura 6: Medição de rotações sobre um apoio intermédio



Figura 7: Pormenor de um clinómetro eléctrico

4.2. Ensaios realizados

Os ensaios efectuados consistiram no posicionamento sucessivo de diversos camiões carregados, previamente pesados. Em ambas as estruturas foram realizados diversos conjuntos de casos de carga visando sucessivamente: a maximização da carga suportada pelos apoios intermédios, a determinação de linhas de influência das grandezas medidas, a indução de momentos flectores nas secções de meio vão e de momentos flectores negativos nas secções de apoio intermédio e, finalmente, a aplicação de cargas excêntricas.

Na PS 102 as cargas de ensaio foram materializadas por quatro camiões previamente pesados, com um peso total de cerca de 1110 kN. Nas figuras 8 a 11 apresentam-se diferentes fases dos ensaios, nomeadamente, o carregamento do apoio intermédio (Figura 8), a determinação de linhas de influência, realizada através da utilização de dois camiões dispostos em linha perpendicularmente o eixo da obra (Figura 9), a indução de significativos momentos flectores na secção de meio vão de um tramo (Figura 10) e, finalmente, a mobilização dos maiores momentos negativos na secção do tabuleiro sobre o pórtico central (Figura 11).



Figura 8: Carregamento do apoio



Figura 9: Determinação de linhas de influência



Figura 10: Carregamento de um tramo



Figura 11: Carregamento dos dois tramos

Nos ensaios da ponte sobre o rio Felgueiras, que incidiram sobre o tabuleiro destinado ao tráfego descendente, foram utilizados seis camiões, perfazendo uma carga total de cerca de 1 677 kN, que foram colocados em 21 posições ao longo do tabuleiro. Estas posições de carga visavam os objectivos anteriormente descritos, apresentando-se na Figura 10 o carregamento de um pilar e na Figura 11 uma fase dos ensaios correspondente à determinação de linhas de influência, em que foram utilizados três camiões dispostos perpendicularmente ao eixo do tabuleiro.



Figura 12: Carregamento de um apoio



Figura 13: Carregamento dos dois tramos

4.3. Resultados obtidos

De entre o conjunto de resultados obtidos no decurso dos ensaios das duas estruturas seleccionaram-se alguns que permitem caracterizar, de forma tão global quanto possível, o comportamento destas obras e, em particular, o efeito das juntas belgas.

Optou-se por apresentar, relativamente à PS 102, as linhas de influência do deslocamento vertical na secção de meio vão do tramo de 24 m (Figura 14) bem como as deformadas relativas a dois casos de carga, um correspondente ao carregamento de apenas um tramo (Figura 15), em que se registou o deslocamento máximo de 6,1 mm, e o outro ao carregamento simultâneo de ambos os tramos (Figura 16).

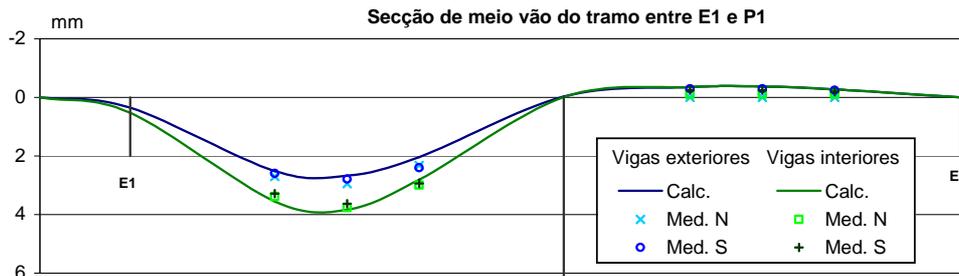


Figura 14: PS102: linha de influência dos deslocamentos verticais

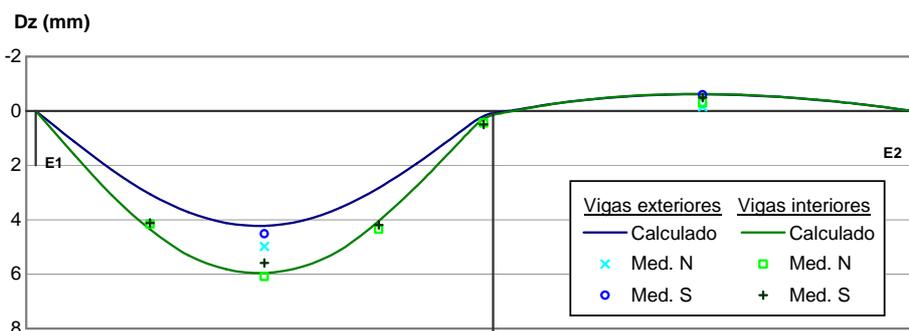


Figura 15: PS102: deformada correspondente ao carregamento do tramo de 24 m

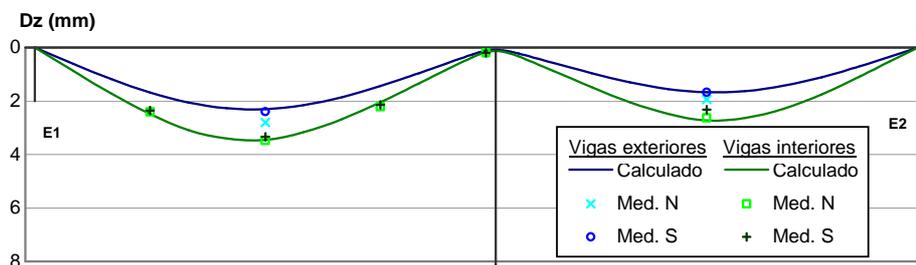


Figura 16: PS102: deformada correspondente ao carregamento dos dois tramos

Do conjunto de resultados obtidos durante os ensaios da ponte de Felgueiras apresentam-se na Figura 17 as linhas de influência das rotações longitudinais medidas sobre o pilar P1, determinadas experimentalmente através do sucessivo posicionamento de três camiões carregados. As rotações medidas incluídas nesta figura foram obtidas através de dois clinómetros eléctricos colocados em duas vigas do mesmo alinhamento pertencentes a dois tramos consecutivos. Na referida figura incluem-se também as linhas de influência estimadas através do modelo numérico utilizado. Esta figura evidencia a fraca continuidade existente, sendo diminutas as rotações que ocorrem num tramo quando apenas é carregado o tramo adjacente.

Na Figura 18 apresenta-se a deformada das vigas centrais quando as cargas de ensaio se encontravam colocadas na secção de meio vão do tramo compreendido entre os pilares P1 e P2. Também esta figura é elucidativa relativamente à pequena continuidade entre os tramos, que se traduz em deslocamentos muito pequenos nos tramos que não têm carga quando o carregamento se concentra num único tramo.

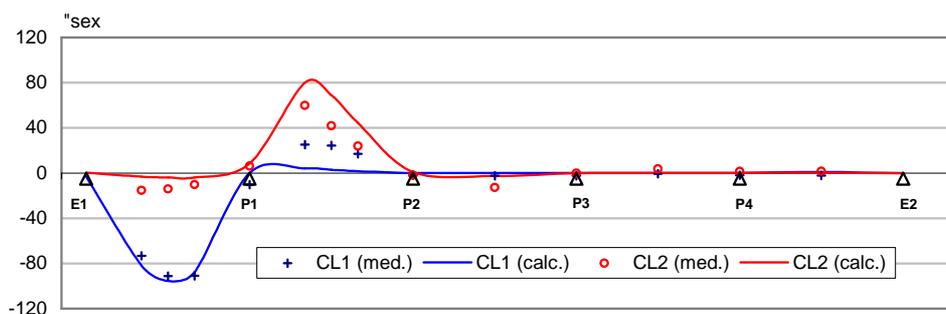


Figura 17: Ponte do rio Felgueiras: linhas de influência das rotações longitudinais

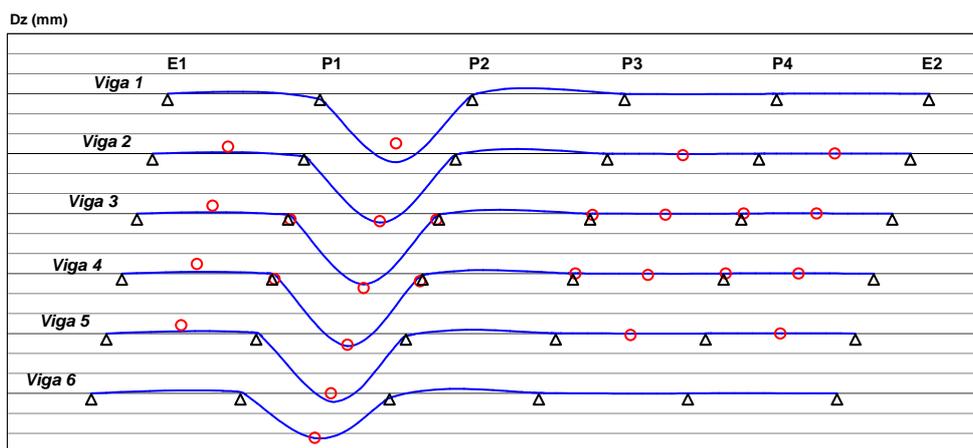


Figura 18: Ponte do rio Felgueiras: deformada devida ao carregamento do tramo P1-P2

5. ENSAIOS DINÂMICOS

5.1. Ensaios realizados

Na passagem superior 102 realizaram-se também ensaios dinâmicos, com o objectivo de avaliar as características dinâmicas da estrutura, nomeadamente, as frequências e configurações dos seus modos naturais de vibração, bem como estimar os respectivos coeficientes de amortecimento. Para tal, foram efectuados dois ensaios que consistiram na medição das acelerações induzidas pela acção do vento e de algum tráfego que já circulava sobre a estrutura num total de 13 pontos no tabuleiro da passagem superior. A localização destes pontos é indicada na Figura 19.

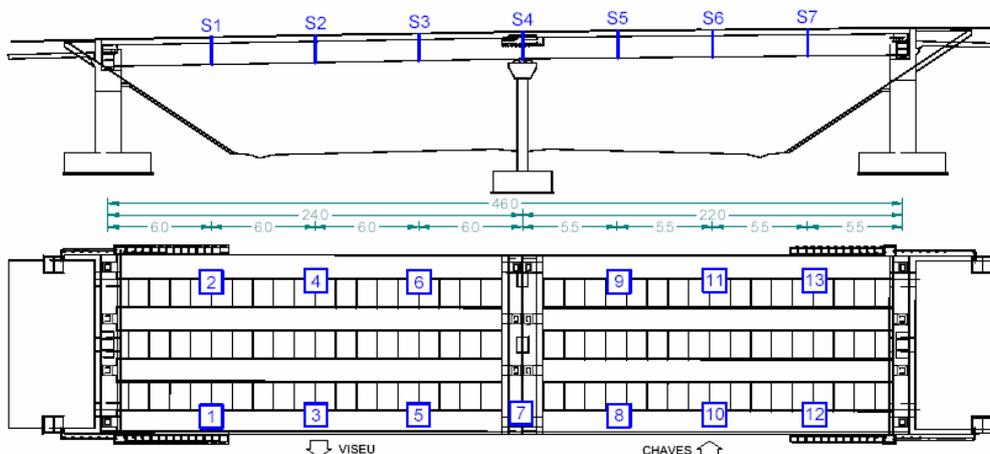


Figura 19: Numeração dos pontos de colocação dos acelerómetros

No quadro 1 apresenta-se a sequência dos ensaios dinâmicos efectuados, indicando-se os pontos instrumentados e a orientação dos acelerómetros em cada ensaio. Utilizaram-se 7 transdutores de referência, que ficaram instalados nos mesmos pontos durante os dois ensaios, enquanto que os restantes 4 acelerómetros foram colocados em pontos diferentes em cada ensaio.

Quadro 1: Pontos instrumentados em cada um dos ensaios dinâmicos

ensaio	unidade 1			unidade 2		unidade 3			unidade 4		
	c.1	c.2	c.3	c.1	c.2	c.1	c.2	c.3	c.1	c.2	c.3
1	1V	3V	5V	6V	10V	12V	11V	13V	3T	7T	10T
2	2V	4V			8V		9V				

Os registos de aceleração obtidos nos ensaios dinâmicos foram adquiridos com uma frequência de amostragem de 1000 Hz. Em cada ensaio obtiveram-se registos com uma duração total de cerca de 22 minutos.

5.2. Instrumentação utilizada

Para a medição de acelerações na estrutura, utilizou-se o seguinte equipamento:

- 11 acelerómetros uniaxiais da marca Kinematics e modelo EpiSensor (ES-U) [9];
- 4 unidades para alimentação e condicionamento de sinal dos acelerómetros ES-U, desenvolvidas no Centro de Instrumentação Científica (CIC) do LNEC;
- equipamento de aquisição de dados da National Instruments, incluindo uma placa de aquisição de dados DAQ Card AI-16XE-50, com conversão analógica/digital a 16 bits, e um chassis SCXI-1000DC com 4 placas SCXI-1140;
- 1 computador portátil;
- cabos para alimentação dos acelerómetros e transmissão do respectivo sinal às unidades de condicionamento e alimentação e destas à placa de aquisição de dados.

Nos ensaios efectuados os acelerómetros ES-U foram configurados com uma sensibilidade de 20 Volt/g. Utilizou-se ainda um factor de ganho de 50 nas unidades de alimentação e condicionamento de sinal. Desta forma, uma vez que a placa DAQ Card AI-16XE-50 aceita à entrada, sinais de $\pm 10,0$ Volt, a amplitude mínima de aceleração que foi possível discretizar nos registos obtidos foi de $0,305 \mu g$.

Na Figura 20 podem-se observar alguns aspectos do equipamento utilizado nos ensaios dinâmicos da passagem superior 102.



Figura 20: Alguns aspectos do equipamento utilizado nos ensaios dinâmicos

5.3. Resultados obtidos

Para a identificação das frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos modos de vibração da PS 102, a partir dos registos de aceleração obtidos nos ensaios dinâmicos, utilizou-se o método aperfeiçoado de decomposição no domínio da frequência (EFDD) implementado no programa ARTeMIS Extractor [10].

Para a aplicação do método EFDD foram estimadas as funções de densidade espectral dos registos de aceleração com uma resolução em frequência de $0,031$ Hz nas estimativas das funções de densidade espectral. As matrizes destas funções foram decompostas em valores e vectores singulares, tendo-se assim obtido espectros de valores singulares, cuja análise é um dos passos importantes do método EFDD.

Na Figura 21 apresentam-se os espectros dos três primeiros valores singulares das matrizes de funções de densidade espectral estimadas com todos os registos de aceleração obtidos nos ensaios dinâmicos

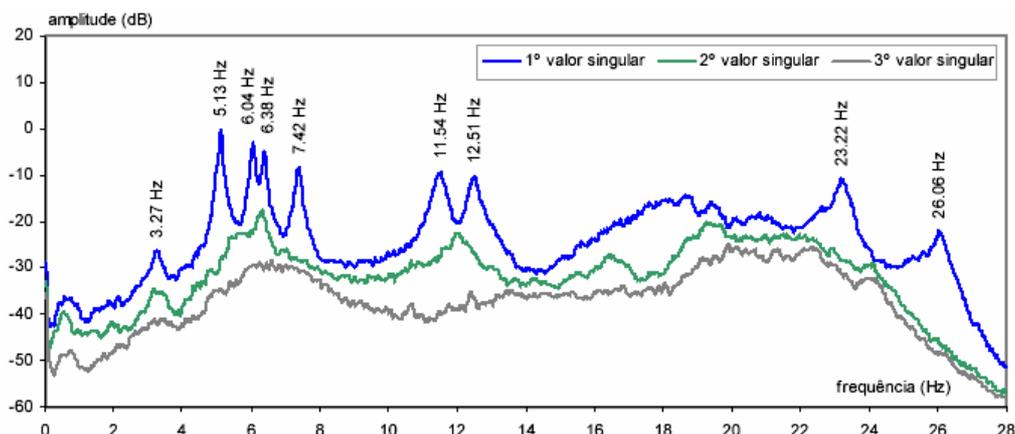


Figura 21: Espectros de valores singulares

Nos espectros apresentados na Figura 21 estão indicados os valores das frequências dos picos de amplitude mais evidentes. Note-se que esses valores não são exactamente iguais às frequências identificadas como correspondentes aos modos naturais de vibração da estrutura, o que resulta dos próprios procedimentos utilizados no método EFDD.

Nos picos de amplitude dos espectros de valores singulares aplicaram-se os procedimentos do método EFDD para identificar as frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos modos naturais de vibração da PS 102. Ao efectuar esta análise, foi também importante comparar as configurações identificadas com as calculadas com o modelo de elementos finitos, de modo a esclarecer dúvidas e confirmar a interpretação dos resultados experimentais.

Através da aplicação do método EFDD foram assim identificados 9 modos de vibração da PS 102. Os valores da frequência (f) e do coeficiente de amortecimento (ξ) de cada um desses modos de vibração são apresentados no quadro 2. Nesse quadro são também indicados os valores das frequências calculadas com o modelo de elementos finitos.

Quadro 2: Características dinâmicas da passagem superior 102

n.º	tipo de modo	experimental		modelo	n.º	tipo de modo	experimental		modelo
		f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)			f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)
1	transversal	3,27	2,6	3,29	6	vertical	11,51	1,3	10,80
2	vertical	5,11	0,9	4,31	7	vertical	12,46	1,1	11,74
3	tor. / vert.	6,06	0,9	6,44	8	vertical	23,21	1,0	18,31
4	tor. / vert.	6,37	0,7	8,17	9	vertical	25,86	1,4	21,08
5	torção	7,39	1,0	12,14					

Na Figura 22 apresenta-se uma comparação gráfica das frequências naturais de vibração obtidas por via experimental e numérica. Como se pode verificar, em relação aos 7 primeiros modos identificados, obteve-se uma boa concordância entre as frequências calculadas e as identificadas experimentalmente, havendo uma maior discrepância no que se refere aos 2 últimos modos identificados.

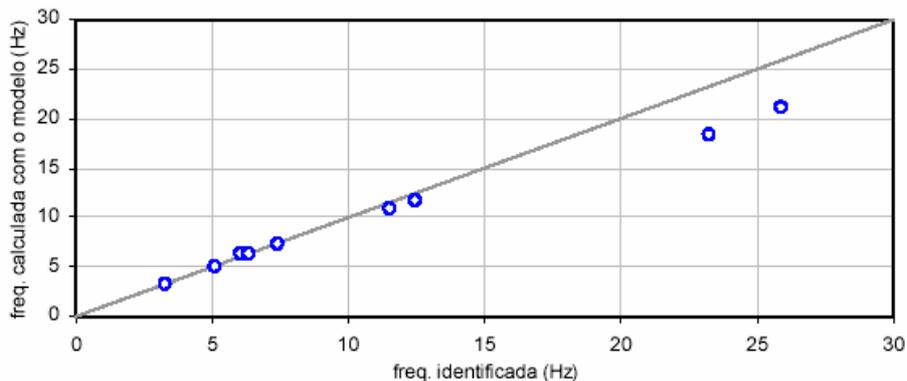


Figura 22: Comparação entre frequências identificadas e calculadas

No que se refere às configurações modais identificadas, mostra-se apenas na figura 23 a do segundo modo identificado, o 1^o modo de vibração vertical do tabuleiro, comparando-a com a correspondente configuração modal calculada com o modelo da estrutura.

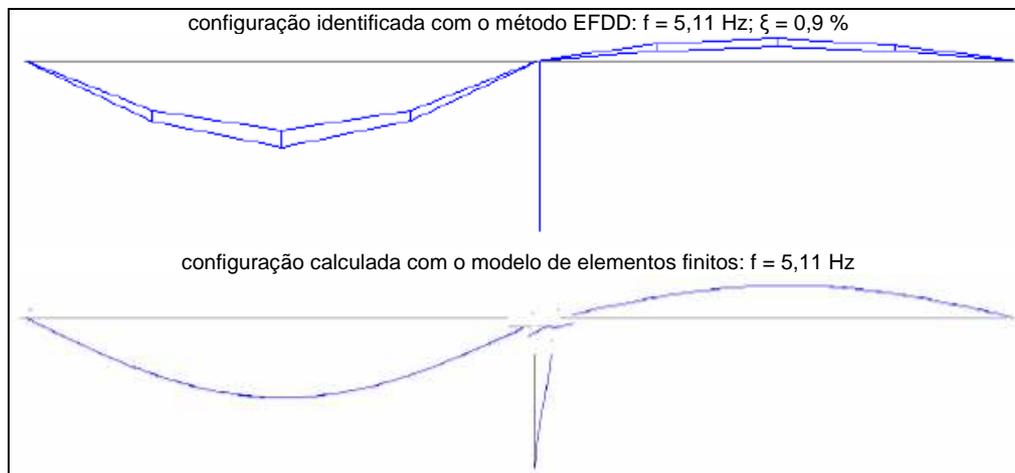


Figura 23: Configurações do 1^o modo de vibração vertical do tabuleiro

É interessante verificar que o efeito da junta belga no comportamento estrutural da PS 102 transparece bem na configuração identificada para o 1^o modo de flexão vertical do tabuleiro (ver Figura 23), pois, nessa configuração (ainda que identificada com uma malha de pontos relativamente esparsa) verifica-se claramente que, na secção sobre o pórtico transversal, não há uma continuidade perfeita da rotação nos dois tramos do tabuleiro.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos experimentalmente nos ensaios realizados revelam que ambas as estruturas tiveram um comportamento elástico e linear para o nível de cargas aplicado, evidenciando uma concordância satisfatória com os valores previstos através do modelo estrutural utilizado e apresentando uma boa recuperação das deformações após a retirada das cargas.

Para além da boa concordância entre a generalidade dos valores medidos e calculados, da análise das figuras apresentadas ressalta a continuidade parcial conferida pelas ligações efectuadas através da junta belga. Com efeito, como é patente nas deformadas e nas linhas de influência das rotações apresentadas, nomeadamente quando as cargas de ensaio se encontravam apenas num tramo, o comportamento das duas estruturas ensaiadas é distinto do comportamento dum tabuleiro composto por tramos independentes isostáticos, uma vez que existe interacção entre os dois tramos, verificando-se uma ligeira contra-flecha num tramo quando se carrega o tramo adjacente. No entanto, essa contra-flecha é claramente inferior à que se verificaria numa estrutura contínua.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Norinter as facilidades concedidas para a realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Gastal, F.; Zia, P. – “Analysis of Bridge Beams with Jointless Decks”, *Durability of Structures*, pp. 555-560, IABSE Symposium, Lisbon, 1989.
- [2] Okeil, A. M.; ElSafty, A. – “Partial Continuity in Bridge Girders with Jointless Decks”, *Practice Periodical on Struct. Design and Construction*, ASCE, Vol. 10, pp. 229-238, Nov. 2005.
- [3] Santos, L. Oliveira; Xu, Min – *Ensaio de carga da Passagem Superior 102 do lanço Castro Daire Sul / Viseu do IP3*, Relatório 387/2005 – NOE, LNEC, 2005.
- [4] Rodrigues, Jorge – *Ensaio dinâmico da Passagem Superior 102 do lanço Castro Daire Sul / Viseu do IP3*, Relatório 07/2006 – NOE, LNEC, 2006.
- [5] Santos, L. Oliveira; Xu, Min – *Ensaio de carga da ponte sobre o rio Felgueiras no sublanço IP4 / Fortunho da Auto-Estrada A24*, Relatório 190/2006 – NOE, LNEC, 2006.
- [6] CSI – SAP2000 – *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, 2000.
- [7] Freyssinet – Terra Armada – *IP3 - Scut Interior Norte. Lanço A: IP5 – Castro Daire Sul, Passagem Superior 102 – Projecto de execução*, Novembro de 2003.
- [8] Streng – *IP3 –SCUT Interior Norte. Sublanço D0 – IP4 / Fortunho. Ponte sobre o rio Felgueiras. Projecto de execução*, Maio de 2004.
- [9] Kinematics, Inc. – *EpiSensor Force-Balance Accelerometer. Model FBA ES-U - User Guide*, Kinematics Inc., 2000.
- [10] SVS - Structural Vibration Solutions - *ARTeMIS Extractor Pro*, Denmark, 2005.