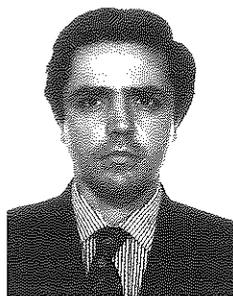


CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DA PONTE 25 DE ABRIL COM BASE EM ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES AMBIENTE



Jorge RODRIGUES
Assistente de Investigação
Departamento de Estruturas
LNEC



A. CAMPOS COSTA
Investigador Principal
Departamento de Estruturas
LNEC

SUMÁRIO

Esta comunicação refere-se aos ensaios de caracterização dinâmica realizados pelo LNEC após a conclusão das obras de alargamento do tabuleiro rodoviário e de colocação do tabuleiro ferroviário na ponte 25 de Abril. Estes ensaios consistiram na medição de acelerações na estrutura resultantes da acção do vento e do tráfego rodoviário, tendo sido efectuados com o objectivo de avaliar experimentalmente as características dinâmicas globais da ponte. Descrevem-se os equipamentos e os procedimentos adoptados nos ensaios, bem como os métodos utilizados na análise dos registos obtidos. Comparam-se também as características dinâmicas avaliadas nos ensaios com as calculadas com um modelo de elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

Após a realização das obras de alargamento do tabuleiro rodoviário e de colocação do tabuleiro ferroviário na ponte 25 de Abril, o LNEC efectuou ensaios de recepção com vista a avaliar experimentalmente o comportamento estrutural da ponte. Esta comunicação refere-se aos ensaios de caracterização dinâmica então realizados, os quais consistiram na medição de acelerações na estrutura resultantes da acção do vento e do tráfego rodoviário. Estes ensaios foram efectuados sem qualquer interrupção do funcionamento normal da ponte e tiveram como principal objectivo a avaliação experimental das características dinâmicas globais da estrutura,

nomeadamente, frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos primeiros modos de vibração.

Nesta comunicação, inicialmente faz-se uma breve descrição da ponte 25 de Abril e das alterações efectuadas com vista à colocação do tabuleiro ferroviário e alargamento do tabuleiro rodoviário. Em seguida, descrevem-se os equipamentos e os procedimentos adoptados nos ensaios, bem como os métodos de identificação modal utilizados na análise dos registos obtidos. As características dinâmicas obtidas experimentalmente são comparadas com as calculadas com um dos modelos de elementos finitos utilizados pelos projectistas da solução estrutural adoptada para as obras efectuadas na ponte 25 de Abril, e também com as determinadas experimentalmente após a conclusão da 1ª fase da construção, através de ensaios realizados pelo LNEC [1] e do sistema de monitorização então instalado na ponte [2, 3].

2. DESCRIÇÃO DA PONTE 25 DE ABRIL

Com a descrição apresentada em seguida, pretende-se apenas delinear sucintamente as características da ponte 25 de Abril e as alterações nela introduzidas para colocação do tabuleiro ferroviário e alargamento do tabuleiro rodoviário. Uma descrição mais detalhada dessas alterações e das diferentes soluções estudadas pode ser consultada em [4, 5, 6].

A ponte 25 de Abril é uma ponte suspensa com um vão central de 1013 m, dois vãos laterais suspensos de 483 m, e três vãos não suspensos, dois de 100 m e um de 99 m, perfazendo um comprimento total de 2278 m entre maciços de amarração (ver figura 1). Considerando ainda o viaduto de acesso existente na margem Norte, o comprimento total em estrutura elevada atinge os 3223 m.

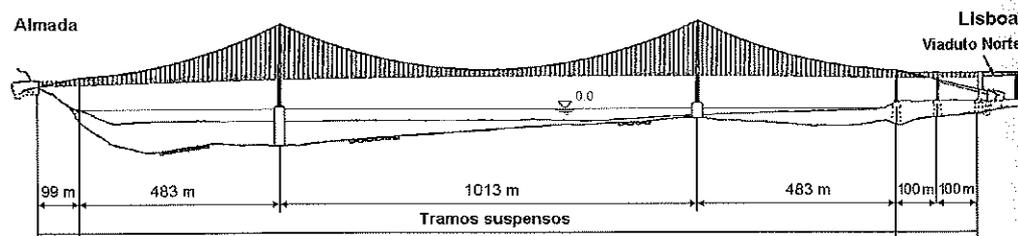


Figura 1 : Corte longitudinal da ponte 25 de Abril

Desde o projecto inicial, a ponte foi planeada para receber tráfego rodoviário e ferroviário, no entanto, na altura da construção, decidiu-se que a mesma seria efectuada em duas fases: uma inicial que compreenderia a construção de um tabuleiro rodoviário com quatro 4 vias; e uma 2ª fase que envolveria a instalação do caminho de ferro de via dupla e o reforço da estrutura. A fase inicial foi completada em 1966 e só nos finais da década de 90 foi possível avançar com a 2ª fase. Entretanto, durante os 30 anos de serviço da ponte, o volume de tráfego rodoviário

aumentou significativamente, de modo que optou-se por efectuar também o alargamento do tabuleiro rodoviário para 6 vias.

A solução estrutural adoptada para o alargamento do tabuleiro rodoviário e colocação do tabuleiro ferroviário na ponte 25 de Abril, consistiu, fundamentalmente, na instalação de um novo par de cabos de suspensão, dispostos superiormente aos cabos de suspensão principais, ancorados em maciços de amarração colocados ao lado dos já existentes, e com pendurais dispostos a cada 23 m, alternando os pontos de suspensão com os dos pendurais dos cabos principais. Com a solução escolhida, conseguiu-se que o reforço da corda superior e diagonais da viga de rigidez, fosse necessário apenas nas zonas próximas dos apoios. Não foi necessário introduzir reforços nas torres, uma vez que na solução inicialmente pensada para a 2ª fase da construção, elas estariam sujeitas a esforços maiores do que aqueles que têm de suportar com a solução adoptada. Os pilares de desvio dos cabos tiveram que ser reforçados ao longo de toda a sua altura através de chapas exteriores, e no seu topo foi necessário colocar um tirante para equilibrar as componentes horizontais resultantes do desvio lateral dos novos cabos de suspensão para os seus maciços de amarração.

Com as obras efectuadas a carga permanente suspensa na ponte sofreu um aumento de cerca de 50 %, sendo as cargas adicionais totalmente suportadas pelos novos cabos [4].

3. ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES AMBIENTE

3.1. Objectivos

Os ensaios [7] apresentados nesta comunicação, foram efectuados em Junho de 1999, antes do início da circulação de comboios na ponte, tendo tido como principal objectivo, a identificação experimental das frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos primeiros modos de vibração globais da estrutura. A avaliação in-situ dessas características dinâmicas foi efectuada com o intuito de compará-las com as calculadas com os modelos utilizados pelos projectistas (Steinman Boynton Gronquist & Birdsall) da solução estrutural adoptada e também com as avaliadas experimentalmente pelo LNEC [1, 2, 3] após a conclusão da 1ª fase da construção da ponte. Interessava também estabelecer uma situação de referência, após as alterações introduzidas na ponte, que pudesse ser considerada para a monitorização do estado da estrutura com base na observação das suas características dinâmicas ao longo do tempo.

Dadas as características da ponte (grande vão) e as condições em que os ensaios deveriam ser efectuados (sem interrupção do tráfego), a caracterização dinâmica experimental da ponte 25 de Abril baseou-se na análise de registos de ensaios de medição de vibrações ambiente, realizados sem qualquer interferência no funcionamento normal da ponte.

3.2. Equipamento utilizado nos ensaios

O equipamento utilizado nos ensaios compreendeu um computador portátil, um anemómetro de leitura directa e 4 macro-sismógrafos triaxiais (modelo GSR-16). Estes macro-sismógrafos tinham sido já utilizados noutros ensaios dinâmicos de estruturas de pontes [8, 9].

Os macro-sismógrafos GSR-16 têm um sistema de conversão analógica/digital de 16 bit's e três acelerómetros de tipo servo-controlado que permitem o registo de acelerações em três direcções ortogonais. Na configuração de maior sensibilidade (a utilizada nos ensaios efectuados na ponte 25 de Abril) o menor valor de aceleração que pode ser medido com os GSR-16 é de 0,015 mg. Os sensores dos GSR-16 têm uma gama dinâmica de 120 dB e um comportamento com pouco ruído, boa linearidade e pequenos erros de histerese; a sua resposta dinâmica vai de DC a 50 Hz, uma característica que é extremamente importante para a sua utilização em ensaios de pontes de grande vão, como é o caso da ponte 25 de Abril, que têm frequências naturais de vibração com valores muito baixos.

A configuração das condições de funcionamento dos macro-sismógrafos foi efectuada através do computador portátil, que também serviu para transferir os registos dos GSR-16 para o disco rígido do computador e para efectuar uma análise preliminar das acelerações registadas.

3.3. Técnica de ensaio

Na ponte 25 de Abril foram efectuados um total de 7 ensaios de medição de vibrações ambiente com os 4 GSR-16 a registar simultaneamente as acelerações em 4 pontos diferentes da estrutura. Em cada ensaio, os 4 pontos estiveram sempre localizados em duas secções transversais diferentes da ponte. Obtiveram-se assim registos de acelerações em 14 pontos diferentes, situados em 7 secções transversais (ver figura 2).



Figura 2 : Secções instrumentadas nos ensaios da ponte 25 de Abril

Em cada secção os GSR-16 foram colocados em pontos localizados na corda superior da viga de rigidez, próximo dos pontos de ligação dos pendurais à viga de rigidez. Conforme se representa na figura 3, só na secção 0 (1/2 vão do tramo central) é que foi possível colocar os aparelhos exactamente nos eixos extremos, enquanto que nas restantes secções eles tiveram que ser colocados junto às longarinas exteriores.

Os pontos instrumentados foram escolhidos a partir da análise de medições preliminares que mostraram que eles seriam adequados para a identificação das características dos modos

globais de vibração da ponte. Medições efectuadas noutros pontos, como por exemplo nos passeios junto às vias de caminho de ferro, mostraram uma grande influência de vibrações locais e choques que dificultariam muito a identificação modal que se pretendia efectuar.

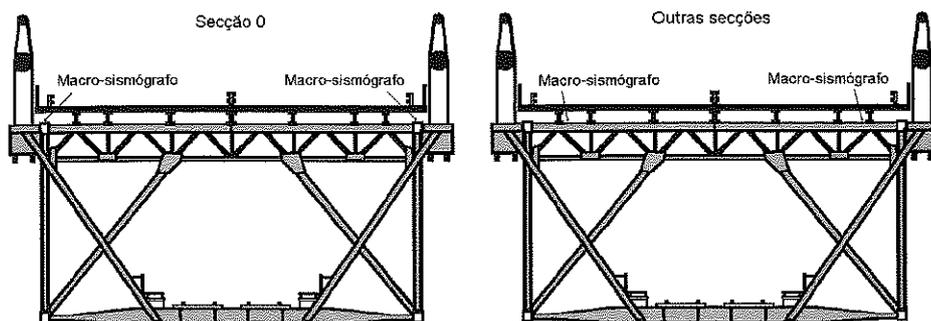


Figura 3 : Pontos instrumentados em cada secção

A escolha das secções que foram instrumentadas (ver figura 2), foi também determinada pelo facto de só nelas existirem passadiços transversais, ligados ao passadiço longitudinal que percorre toda a ponte, de onde foi possível aceder à corda superior da viga de rigidez numa forma segura e sem necessidade de impor restrições ao tráfego rodoviário.

No quadro 1 indicam-se as secções instrumentadas em cada um dos 7 ensaios efectuados na ponte 25 de Abril. Nos ensaios 1 a 3 a secção 22N é a secção de referência, enquanto que nos ensaios 5 a 7 a secção de referência é a secção 22S; no ensaio 4 instrumentaram-se em simultâneo as duas secções 22N e 22S.

Quadro 1: Secções instrumentadas em cada ensaio

Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7
22N	22N	22N	22N	0	46S	66S
66N	46N	0	22S	22S	22S	22S

Considerando as características da ponte, os valores calculados pelos projectistas e a análise efectuada com os registos obtidos em medições preliminares, esperava-se que as frequências dos primeiros modos de vibração da estrutura tivessem valores bastante baixos (à volta de 0,1 Hz) e que alguns modos de vibração tivessem frequências muito próximas. Assim, optou-se por obter registos com uma grande duração, o que permitiria efectuar uma análise com uma resolução em frequência adequada.

A duração total dos registos obtidos em cada ensaio foi de 1h. 5m. 36seg. (6 amostras de 656 seg.). A frequência de amostragem foi de 50 Hz (a menor possível com os GSR-16). Com as durações de registo adoptadas, a memória disponível em cada GSR-16 ficou praticamente esgotada ao fim de cada ensaio; assim, no fim de cada ensaio foi necessário transferir os registos para o disco rígido do computador portátil, antes de prosseguir para o ensaio seguinte.

4. IDENTIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS

A identificação das frequências naturais de vibração da ponte 25 de Abril foi efectuada utilizando uma técnica designada por método básico no domínio da frequência [10] ou método de detecção de picos [11]. Esta técnica envolveu o cálculo e análise dos auto espectros dos registos de aceleração, e das funções de coerência e de resposta em frequência entre registos obtidos simultaneamente em diferentes pontos da estrutura.

A análise dos espectros centrou-se apenas na gama de frequências até aos 2,00 Hz, onde se esperava que os primeiros modos de vibração globais da ponte estivessem situados. Assim, antes do cálculo dos espectros, os registos foram pré-processados através de: a) remoção da componente contínua; b) filtragem com um filtro passa-banda de tipo Butterworth de ordem 8, com frequências de corte de 0,05 Hz e 2,00 Hz.

Os auto espectros e espectros cruzados foram determinados através da transformada de Fourier, para o cálculo da qual utilizou-se o algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT). Cada espectro resultou da média dos espectros calculados com 12 amostras independentes de 16384 valores cada uma, utilizando o método de sobreposição a 50 % [12] e aplicando uma janela de Hanning a cada amostra para reduzir os efeitos de escorregamento (leakage). Para a frequência de amostragem de 50 Hz a resolução em frequência dos espectros é portanto de 0,003 Hz.

Para reunir e sintetizar a informação contida nos auto espectros calculados para os 14 pontos instrumentados, determinaram-se espectros normalizados médios (ANPSD) [10] através do procedimento seguinte: a) normalização dos auto espectros através da divisão das ordenadas espectrais pela área por eles definida (variância dos registos); b) ponderação dos espectros normalizados com a função de coerência entre os registos obtidos em cada secção nos pontos localizados a jusante e a montante, de modo a realçar as ordenadas espectrais correspondentes a movimentos globais da secção; c) cálculo da média dos espectros normalizados ponderados, avaliados para os diferentes pontos da estrutura.

Nas figuras 4, 5 e 6 apresentam-se os espectros normalizados médios correspondentes, respectivamente, à semi-soma das acelerações verticais em cada secção (que salientam os picos de ressonância correspondentes a modos verticais), à semi-diferença das acelerações verticais em cada secção (que salientam os picos de ressonância correspondentes a modos de torção) e às acelerações transversais. Nos espectros normalizados médios apresentados nas figuras 4, 5 e 6, indicam-se também os valores das frequências correspondentes aos picos de ressonância mais evidentes, onde se efectuou uma análise das funções de coerência e das relações de amplitude e fase entre os sinais obtidos nas diferentes secções instrumentadas. A análise da função de coerência $\gamma^2(f)$ permitiu verificar o grau de linearidade da relação entre os movimentos nas diferentes secções, ajudando a confirmar se os picos de ressonância identificados nos espectros, correspondem a movimentos globais da estrutura e portanto a modos naturais de vibração.

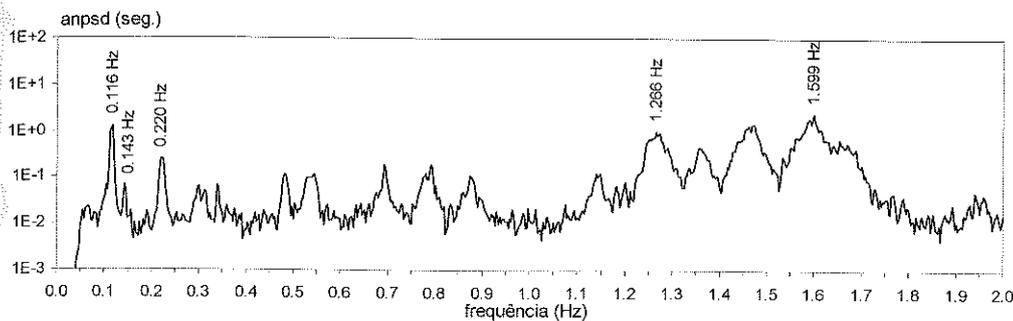


Figura 4 : Espectro normalizado médio da semi-soma das acelerações verticais

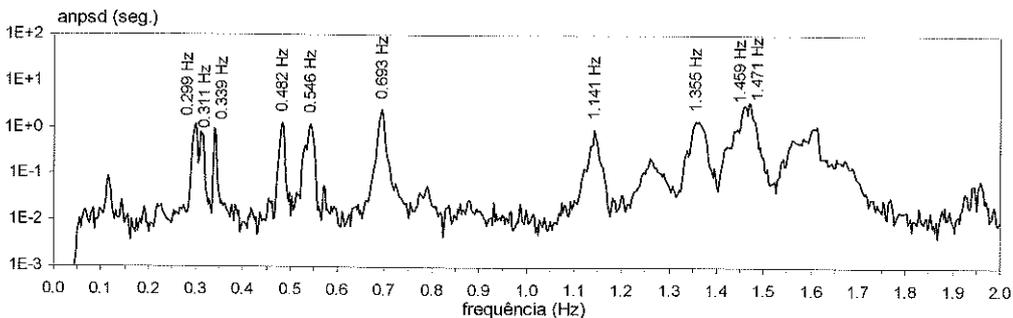


Figura 5 : Espectro normalizado médio da semi-diferença das acelerações verticais

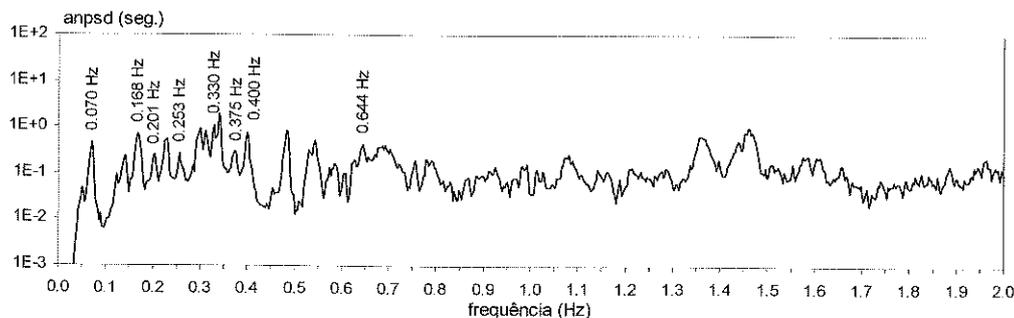


Figura 6 : Espectro normalizado médio das acelerações transversais

A avaliação das configurações modais foi efectuada através do cálculo das estimativas $H_1(f)$ das funções de resposta em frequência entre os registos obtidos nas secções de referência (22N e 22S) e os obtidos em cada uma das restantes secções. A partir dos valores da função de coerência e do número de amostras independentes consideradas, avaliou-se também o erro aleatório normalizado [13] nas estimativas $H_1(f)$, o qual foi utilizado para determinar intervalos de confiança na estimativa das componentes modais. Com o método utilizado, foram identificadas um total de 13 configurações de modos de vibração da ponte 25 de Abril; nas

figuras 7 a 9 apresentam-se algumas dessas configurações que incluem barras de erro que representam os intervalos de confiança a 95 % na estimativa das componentes modais.

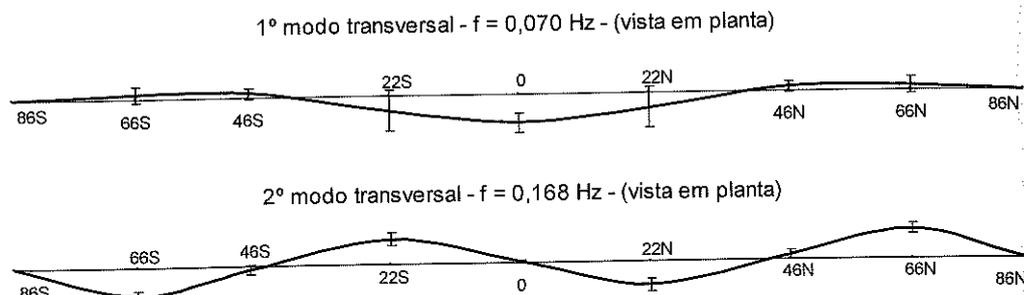


Figura 7 : Configurações identificadas para o 1º e 2º modos transversais

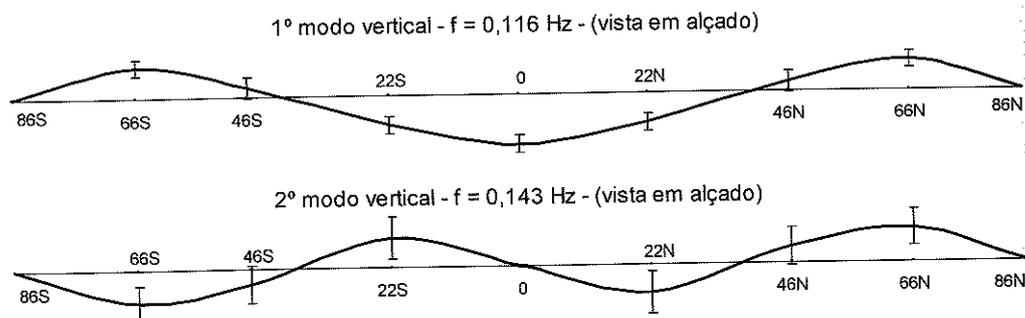


Figura 8 : Configurações identificadas para o 1º e 2º modos verticais

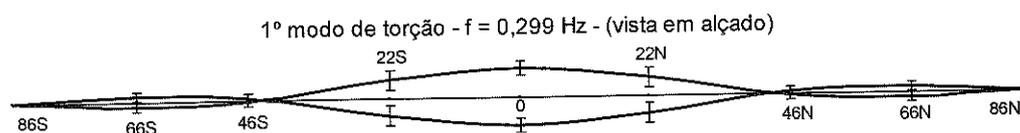


Figura 9 : Configuração identificada para o 1º modo de torção

Para estimar os coeficientes de amortecimento dos modos de vibração identificados experimentalmente, utilizou-se uma técnica de ajuste dum espectro analítico aos picos de ressonância dos auto espectros das acelerações registadas nos ensaios. O espectro analítico ajustado é o correspondente à resposta em aceleração de um sistema com um grau de liberdade sujeito a uma acção de densidade espectral constante ("ruído branco"). Os valores estimados para os coeficientes de amortecimento ξ são apresentados no quadro 2, onde se resumem as características dinâmicas da ponte 25 de Abril, identificadas com base na análise dos registos obtidos nos ensaios de medição de vibrações ambiente. No quadro 2 indicam-se também as frequências calculadas com o modelo analítico espacial utilizado pelos projectistas da solução estrutural adoptada para o alargamento do tabuleiro rodoviário e colocação do tabuleiro ferroviário na ponte 25 de Abril.

Quadro 2: Características dinâmicas da ponte 25 de Abril

modos transversais			modos verticais			modos de torção		
frequência (Hz)		ξ (%)	frequência (Hz)		ξ (%)	frequência (Hz)		ξ (%)
ensaios	modelo analítico		ensaios	modelo analítico		ensaios	modelo analítico	
0,070	0,068	3,8	0,116	0,110	1,4	0,299	0,261	0,7
0,168	0,149	2,0	0,143	0,133	2,1	0,311	-	1,0
0,201	0,188	1,4	0,220	0,207	2,0	0,339	-	0,3
0,229	-	0,9	1,266	-	2,6	0,482	-	0,8
0,253	-	0,8	1,599	-	0,9	0,546	-	0,8
0,330	-	0,4				0,693	-	0,7
0,375	-	0,6				1,141	-	0,8
0,400	-	0,9				1,355	-	0,6
0,644	-	0,6				1,459	-	0,6
						1,471	-	0,3

5. CONCLUSÕES

Os ensaios de medição de vibrações ambiente efectuados na ponte 25 de Abril permitiram avaliar experimentalmente as frequências, configurações e coeficientes de amortecimento de vários dos seus modos naturais de vibração. O facto de a ponte ter as primeiras frequências naturais com valores bastante baixos, constituiu por si só um desafio para a realização deste trabalho, nomeadamente em termos de verificar se o equipamento utilizado tinha de facto uma resposta adequada nessa gama de frequências.

Conforme se pode verificar nos valores apresentados no quadro 2, as frequências calculadas pelos projectistas, com um modelo de elementos finitos espacial, concordam razoavelmente com as identificadas experimentalmente (a maior diferença verifica-se na frequência do 1º modo de torção, com um erro relativo de 12,7 %).

Os valores identificados para as frequências dos primeiros modos transversal e vertical, respectivamente, 0,070 Hz e 0,116 Hz, são próximos dos avaliados experimentalmente após a conclusão da 1ª fase da construção, através de ensaios realizados pelo LNEC [1] e do sistema de monitorização então instalado na ponte [2, 3]. Uma vez que essas frequências não se alteraram significativamente com as obras de alargamento do tabuleiro rodoviário e de colocação do tabuleiro ferroviário, pode-se depreender que o acréscimo de 50 % nas cargas permanentes [4] (massa) foi correspondido com igual acréscimo na rigidez da estrutura.

As características dinâmicas identificadas através dos ensaios apresentados, constituem uma situação de referência, para a monitorização do estado da estrutura com base na observação das suas características dinâmicas ao longo do tempo, quer através da realização periódica de ensaios semelhantes quer com um sistema de monitorização permanente.

6. AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Eng.º Mário Castanheta, investigador coordenador do LNEC e responsável pela coordenação geral dos ensaios efectuados na ponte 25 de Abril. Agradece-se também ao Eng.º Jorge Saraiva, investigador coordenador do LNEC. Agradece-se ainda à técnica experimentadora Anabela Martins e ao auxiliar técnico de ensaios Paulo Madeira, pela sua colaboração na realização dos ensaios.

Os métodos de identificação modal aplicados no estudo apresentado nesta comunicação, foram desenvolvidos no âmbito do projecto de investigação programada do LNEC 35/11/14745 – Identificação dinâmica de estruturas de engenharia civil.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Marecos, J. *et al* - *Ensaio de carga da ponte sobre o Tejo – Ponte Suspensa*, Relatório LNEC, 1967.
- [2] Marecos, J. *et al* - "Field observations of Tagus river suspension bridge", *Journal of the Structural Division – Proceedings of the ASCE*, ST4, 1969, p. 555-583.
- [3] Marecos, J. *et al* - *Observação da ponte sobre o Tejo – Tensões e deslocamentos na estrutura principal (observações a longo prazo)*, Relatório LNEC, 1970.
- [4] Crawford, C.; Moniz, L.C. - "Instalação do caminho de ferro e alargamento do tabuleiro rodoviário na ponte suspensa sobre o rio Tejo", *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, n.º 41, 1997, p. 49-54.
- [5] Crawford, C.; Barbas, J.A. - "Railroad addition to Tagus river bridge", *International Conference NEWTECH 97*, LNEC, Lisbon, 1997.
- [6] Fernandes, M. - "Upgrading of Tagus suspension bridge – Lisbon, Portugal", *International Conference NEWTECH 97*, LNEC, Lisbon, 1997.
- [7] Rodrigues, J.; Costa, A.C. - *Caracterização dinâmica da ponte 25 de Abril com base na medição de vibrações ambiente*, Relatório 220/99, LNEC, 1999.
- [8] Rodrigues, J.; Costa, A.C. - "Caracterização dinâmica de estruturas de pontes com base em ensaios de vibrações ambiente", *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, n.º 44, 1998, p. 49-54.
- [9] Rodrigues, J.; Costa, A.C. - "Caracterização dinâmica experimental da ponte Miguel Torga", *4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica*, Faro, 1999.
- [10] Ventura, C.; Brincker R. - *Modal identification of output only systems – Course notes*, Short Course, Universidad Politecnica de Madrid, June 5-6, 2000.
- [11] Andersen, P. *et al* - "Comparison of system identification methods using ambient bridge test data", *IMAC XVII*, Kissimmee, Florida, USA, February 8-11, 1999.
- [12] Delaunay, D. *et al* - "Wind response of long-span bridges: in-situ measurements and modal analysis", *IMAC XVII*, Kissimmee, Florida, USA, February 8-11, 1999.
- [13] Bendat, J.; Piersol, T. - *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2000.