

ENSAIOS DINÂMICOS DE VIADUTOS FERROVIÁRIOS: AUTOMATIZAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE ENSAIO E PROCESSAMENTO

F. Magalhães¹, A. Cunha², E. Caetano³

¹ Assistente, ² Prof. Associado c/ Agregação, ³ Prof^a. Auxiliar
Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



RESUMO

No contexto da realização de ensaios dinâmicos de recepção de viadutos ferroviários, são apresentados procedimentos de ensaio e de processamento da informação recolhida, desenvolvidos com o objectivo de automatizar a identificação dos parâmetros modais com base nas respostas das estruturas às acções ambientais. A metodologia desenvolvida é aplicada a vários viadutos e os parâmetros modais identificados são comparados com os calculados através de modelos numéricos.

1 - INTRODUÇÃO

A identificação modal de pontes rodoviárias ou ferroviárias com base na realização de ensaios de vibração ambiental tem ganho um interesse e popularidade crescentes ao longo dos últimos anos, possibilitando uma estimativa bastante rigorosa dos parâmetros dinâmicos mais representativos da estrutura na fase de recepção. Estes ensaios têm, em relação aos ensaios tradicionais, a vantagem de não necessitarem da aplicação de qualquer tipo de excitação artificial, sendo apenas baseados na resposta da estrutura às acções ambientais, como por exemplo o vento. Este aspecto torna a sua realização bastante simples e económica, uma vez que o equipamento usado é bastante portátil e pelo facto de poderem ser realizados sem interrupção do normal funcionamento da ponte.

A informação fornecida pelos ensaios de vibração ambiental (frequências naturais e modos de vibração) permite aferir se o comportamento da estrutura é concor-

dante com o previsto a nível de projecto, possibilitando a validação e eventual actualização da modelação numérica desenvolvida. Além disso, os valores medidos na fase de recepção constituem uma referência susceptível de permitir avaliar, em fase posterior de utilização da estrutura, o seu nível de degradação estrutural, após um eventual acidente ou devido ao envelhecimento natural dos materiais.

Neste contexto, o Laboratório de Vibrações e Monitorização de Estruturas (Vibest - www.fe.up.pt/vibest) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto tem sido contratado pela REFER (Rede Ferroviária Nacional) para realizar ensaios dinâmicos de recepção de viadutos ferroviários, tendo efectuado recentemente, em particular, ensaios em 5 obras de arte realizadas durante a remodelação da Linha Porto-Guimarães e em 2 viadutos construídos durante a remodelação da Linha Porto-Braga.

O número crescente de solicitações desta natureza motivou a sistematização dos procedimentos de ensaio, com vista a permitir a realização de testes de forma rápida e económica em meios humanos, bem como a automatização do processamento do grande volume de informação experimental recolhida, para obtenção de resultados e elaboração de relatórios técnicos em curto espaço de tempo.

No presente artigo é descrita a metodologia de ensaio adoptada, são caracterizadas as ferramentas desenvolvidas em ambiente MatLab para processar a informação recolhida e efectuar a identificação dos parâmetros modais, e são apresentados resultados para ilustrar a qualidade da informação conseguida através dos ensaios realizados.

2 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

A adequada selecção do equipamento de medição é essencial para garantir o sucesso do ensaio. Nas aplicações realizadas, a medição da resposta dinâmica das estruturas a acções de carácter ambiental foi efectuada com recurso a quatro sismógrafos, munidos de acelerómetros triaxiais de tipo “force-balance” e conversores analógico-digitais de 18 bit. Estas estações de medida são completamente independentes, não necessitando de ser conectadas entre si ou a um sistema central através de cabos, uma vez que possuem uma bateria interna recarregável, memória interna materializada por cartões amovíveis do tipo “Compact Flash”, que mediante a utilização de um leitor de cartões permitem uma rápida transferência da informação recolhida para um computador, e sensores de GPS que garantem a sua perfeita sincronização temporal. A ausência de instalação de cabos ao longo de toda a estrutura reduz drasticamente o tempo de preparação do ensaio e permite a sua realização com pouca mão-de-obra.

A medição da resposta da estrutura sem recorrer a qualquer tipo de excitação artificial tem como consequência o registo de acelerações de muito baixa amplitude, sendo portanto necessária a utilização de equipamento com elevada sensibilidade e

resolução. Os acelerómetros utilizados têm uma sensibilidade de 5V/g numa gama de medida entre -0.5 e +0.5 g e os conversores analógico-digitais de 18 bit permitem uma resolução de cerca de 4 μ g.



Fig 1 – Sismógrafos com sensor de GPS externo

Os ensaios são realizados recorrendo a diferentes disposições dos sismógrafos sobre a estrutura (“setups”). Em cada “setup”, um dos sismógrafos é posicionado de forma fixa sobre um ponto de referência, enquanto os restantes três funcionam como sensores móveis, sendo sucessivamente colocados ao longo dos restantes pontos de medida.

Nos viadutos em que os modos de torção não são considerados relevantes, as medições são realizadas apenas ao longo de um alinhamento longitudinal. Quando é importante a identificação de modos de torção, são efectuadas medições em simultâneo em dois pontos opostos de pelo menos uma secção transversal. Na generalidade das estruturas consegue-se uma boa caracterização das configurações modais realizando medições nos pontos do tabuleiro em correspondência com os topos dos pilares e as secções do tabuleiro a quarto e meio de cada vão. Os sismógrafos devem ser colocados o mais próximo possível dos elementos longitudinais de maior rigidez, para evitar o aparecimento nas séries temporais de contribuições de modos locais de flexão das consolas laterais ou das lajes entre vigas longitudinais.

A selecção da secção de referência tem que ser realizada com algum cuidado, pois tem que ser uma secção em que todos os modos de vibração que se pretendem identificar apresentem ordenada modal não

desprezável. Assim, a sua escolha tem que ser baseada em configurações modais previamente estimadas através de um modelo numérico da estrutura ou, no caso de estruturas simples, em alguma sensibilidade estrutural. Os resultados obtidos para cada um dos modos são tanto melhores, quanto mais elevadas as suas ordenadas modais na secção de referência.

A programação dos sismógrafos é realizada conectando, no início do ensaio, cada um deles a um computador portátil. Nesta operação é necessário definir o tempo de aquisição dos “setups” e o tempo necessário para mudar a posição dos sensores móveis. O tempo de aquisição seleccionado condiciona a qualidade dos resultados, pois, no método de identificação aplicado, dele depende a resolução em frequência, usada na identificação das frequências naturais, e o número de médias que é possível realizar para redução dos erros aleatórios. No ensaio de viadutos ferroviários correntes, com frequências superiores a 2 Hz, 10 minutos de aquisição são, na generalidade dos casos, suficientes, na medida em que permitem uma resolução em frequência de 0.02 Hz (erro na determinação das frequências inferior a 1%) e a realização de 20 médias, desde que se considere alguma sobreposição entre os segmentos seleccionados.

3 - MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO

3.1 - Introdução aos métodos de identificação estocásticos

Os métodos de identificação estocásticos correspondem a algoritmos matemáticos que estimam as propriedades modais das estruturas (frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento modais) com base na sua resposta às acções ambientais. Estes são designados de estocásticos pelo facto da acção desconhecida ser idealizada através do conceito de processo estocástico. Como a excitação ambiental é o resultado da contribuição de várias fontes, ela é, de forma simplificada, representada por um processo estocástico do tipo ruído branco, ou seja, um processo com contribuição uniforme de todas as frequências.

A classificação dos métodos de identificação é usualmente realizada em função do tipo de dados utilizados como ponto de partida para a sua aplicação, podendo aqueles basearem-se directamente em séries temporais, em correlações ou em estimativas espectrais. Seguindo esta classificação existem dois grandes grupos: os métodos que se baseiam nas estimativas espectrais e que portanto trabalham no domínio da frequência, e os métodos que se apoiam nas correlações ou directamente nas séries temporais e que consequentemente operam no domínio do tempo.

Actualmente, nas aplicações de Engenharia Civil existem quatro métodos que, ou pela sua facilidade de aplicação ou pela superior qualidade dos seus resultados, têm merecido especial destaque. Dois são desenvolvidos no domínio da frequência: Método da Selecção de Picos (“Peak-Picking” - PP) e Método de Decomposição no Domínio da Frequência (FDD). Outros dois no domínio do tempo: Identificação Estocástica em Subespaços, a partir das correlações (SSI-COV) ou a partir das séries temporais (SSI-DATA).

O método da selecção de picos foi o primeiro método a ser usado no contexto de ensaios de vibração ambiental. Este é o método mais simples e de aplicação mais rápida, pelo que é o mais adequado para aplicações relativamente simples e onde a automatização de procedimentos é o aspecto mais importante. As principais limitações deste método são a sua dificuldade em identificar modos de vibração com frequências próximas e a incapacidade de fornecer estimativas fiáveis dos coeficientes de amortecimentos modais.

O Método de Decomposição no Domínio da Frequência (Brincker et al. 2000) é um método que procura ultrapassar algumas das dificuldades do método da selecção de picos, tentando contudo manter a sua simplicidade conceptual. O algoritmo deste método é baseado na decomposição em valores singulares da matriz dos espectros das respostas medidas. Esta operação matemática possibilita a obtenção de auto-espectros, que individualizam a contribuição de cada um dos modos, mesmo quando existem frequências naturais próximas.

Estas funções, para além de permitirem a identificação das frequências naturais, permitem, através da aplicação de FFTs inversas, a obtenção de estimativas dos coeficientes de amortecimento modais com algum rigor.

Os métodos de identificação no domínio do tempo baseados em subespaços são métodos paramétricos que realizam a identificação de modelos de estado, a partir dos quais é possível, numa segunda fase, extrair os parâmetros modais (Peeters 2000). O seu ponto de partida pode corresponder a matrizes de correlações das respostas da estrutura ou, em alternativa, matrizes constituídas directamente a partir das séries temporais. Estes métodos conduzem a estimativas mais rigorosas. No entanto, a sua aplicação exige um maior esforço de cálculo e envolve conceitos mais abstractos, com os quais a comunidade de Engenheiros Civil está em geral pouco familiarizada.

No ensaio de viadutos relativamente simples, onde não são esperados modos com frequências naturais próximas e onde a estimativa dos coeficientes de amortecimento não é requerida, sendo objectivo principal a validação da modelação numérica e o estabelecimento de uma caracterização de referência inicial da estrutura, o método mais adequado é o método da selecção de picos, pois permite a obtenção de resultados mais rapidamente. Dada a sua importância no contexto deste artigo, este método será descrito com algum detalhe na sub-secção seguinte.

Os outros três métodos são adequados na análise de estruturas mais complexas, como por exemplo pontes suspensas ou atirantadas ou coberturas de grande vão, onde o aparecimento de modos com frequências próximas é provável e onde a estimativa dos coeficientes de amortecimento modais é essencial, pois estes condicionam de forma relevante o seu comportamento aerodinâmico. A qualidade dos resultados fornecidos por estes métodos mais sofisticados pode ser confirmada em duas aplicações realizadas recentemente pelo VIBEST sobre a Ponte Internacional do Guadiana (Magalhães et al. 2005) e

sobre a cobertura do novo Estádio do Braga (Magalhães et al. 2006).

3.2 - Descrição do método da selecção de picos

O método da selecção de picos é um método de 1 grau de liberdade, pois assume que para frequências próximas das frequências naturais da estrutura, a sua resposta dinâmica é essencialmente condicionada pela contribuição do modo ressonante, o que é equivalente a simular o comportamento da estrutura, nessa gama de frequências, através de um oscilador de um grau de liberdade com a mesma frequência e o mesmo coeficiente de amortecimento do modo ressonante. Esta aproximação é válida quando os diferentes modos de vibração da estrutura se encontram bem separados.

Assim, neste método, as frequências naturais são determinadas a partir dos picos dos espectros de potência (PSD) das acelerações medidas na estrutura, solicitada por acções ambientais.

Num ensaio de vibração ambiental, as acelerações são medidas em vários pontos da estrutura, não bastando analisar os picos do espectro de potência relativos a um dos pontos de medida, pois este pode estar situado junto a um nodo de um ou mais modos de vibração. Assim, um bom procedimento consiste em analisar os picos dos espectros de todas as séries de acelerações registadas. Para evitar a análise de vários gráficos, um para cada ponto de medida, é usual calcular um espectro médio normalizado (ANPSD) (Felber 1993):

$$ANPSD(\omega) = \frac{1}{l} \cdot \sum_{i=1}^l NPSD(\omega) \quad (1)$$

em que l é o número de pontos de medida, sendo os espectros normalizados obtidos dividindo as estimativas dos auto-espectros (PSD) pela soma das suas N ordenadas:

$$NPSD(\omega) = \frac{PSD(\omega)}{\sum_{i=1}^N PSD(\omega)} \quad (2)$$

A importância da normalização decorre do facto de as séries associadas a cada sec-

ção não serem todas captadas em simultâneo, podendo portanto existir diferenças de intensidade da excitação, conduzindo a espectros com diferentes conteúdos energéticos.

Desta forma, basta analisar os picos do espectro de potência médio normalizado para identificar todas as frequências naturais da estrutura.

A identificação dos modos de vibração é baseada numa função complexa designada de função de transferência da resposta ambiental e que é calculada através da primeira igualdade da equação:

$$\tilde{H}_{ab}(\omega_i) = \frac{\tilde{S}_{ab}(\omega_i)}{\tilde{S}_{bb}(\omega_i)} = \frac{\varphi_{ia}}{\varphi_{ib}} \quad (3)$$

Na equação anterior a e b simbolizam pontos genéricos da estrutura, $\tilde{S}_{bb}(\omega_i)$ a estimativa média do espectro de potência das acelerações medidas em b , $\tilde{S}_{ab}(\omega_i)$ a estimativa média da função densidade espectral cruzada das respostas medidas em a e em b , φ_{ia} a ordenada modal do modo i no ponto a e φ_{ib} a ordenada modal do modo i no ponto b . A segunda igualdade, demonstrada em (Magalhães 2004), justifica a metodologia usada para obtenção das configurações modais.

Considerando como ponto de referência o ponto b , e fazendo corresponder o ponto a a diferentes secções da estrutura, obtém-se o modo de vibração i , a menos de um factor de escala e do sinal, por avaliação da amplitude das diferentes funções de transferência relacionando a resposta ambiental no ponto fixo b e no ponto móvel a para a frequência ω_i (frequência do modo i).

O sinal de cada ordenada dos modos de vibração é avaliado observando a evolução da fase da função de transferência: se a fase da função de transferência entre uma dada secção e a secção de referência for próxima de 0° , a ordenada modal desse ponto tem o mesmo sinal que a ordenada do ponto de referência; se a fase for próxima de 180° , tem sinal contrário.

A função de coerência é uma medida da correlação entre dois sinais, calculada a partir da seguinte expressão:

$$\tilde{\gamma}_{ab}^2(\omega) = \frac{\tilde{S}_{ab}(\omega)^2}{\tilde{S}_{aa}(\omega) \cdot \tilde{S}_{bb}(\omega)} \quad (4)$$

Como tal, pode ser usada para avaliar o nível de ruído dos dados recolhidos. Valores próximos da unidade indicam que o nível de ruído é baixo e que o sistema tem comportamento linear, enquanto que valores baixos apontam para níveis de ruído elevados. Para frequências próximas das frequências naturais, a amplitude da resposta é mais elevada, pelo que a relação entre o nível de sinal e o nível de ruído é maior, sendo portanto expectável que a função de coerência assuma valores próximos da unidade.

4 - AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSAMENTO

Com o objectivo de realizar o processamento da informação recolhida nos ensaios de vibração ambiental de forma automática foi desenvolvido um programa em MatLab que, a partir das séries temporais das acelerações medidas na estrutura sujeita a excitações ambientais, permite efectuar, através da aplicação do Método da Selecção de Picos, a identificação das suas frequências próprias e correspondentes modos de vibração.

O programa é constituído pelas seguintes rotinas: *preteva*, *teva* e *posteva*.

A rotina *preteva* recolhe as séries temporais das acelerações registadas nos ficheiros gravados no equipamento de aquisição, realiza o seu pré-processamento e identifica em cada registo o máximo, o mínimo e o desvio padrão, que são indicadores do nível de sinal recolhido. Para o pré-processamento estão disponíveis as seguintes operações:

- eliminação de tendência – elimina qualquer eventual tendência linear do sinal, através da realização de um ajuste linear à série temporal colhida;
- aplicação de filtros digitais– permite eliminar, numa série temporal, o contributo de um determinado intervalo de frequências, o que pode ser realizado usando diferentes tipos de filtros (Butterworth, Chebyshev ou Bessel);

- decimação – filtra as séries temporais por um filtro passa-baixo e amostra-as com uma frequência inferior, permitindo a eliminação de informação que não é necessária para a análise.

A função *teva*, para os diferentes pares de séries temporais (acelerações de cada ponto instrumentado e acelerações do ponto de referência), calcula os espectros de potência normalizados de ambos os sinais, a função de transferência entre eles e a correspondente função de coerência.

Estimativas simples dos espectros de potência podem ser obtidas a partir da equação:

$$\hat{S}_{YY}(\omega) = \frac{Y(\omega) \cdot Y^*(\omega)}{N \cdot \Delta t} \quad (5)$$

onde Δt é o inverso da frequência de amostragem, N o número total de pontos da série temporal, $Y(\omega)$ é a FFT (Transformada Discreta Finita de Fourier, avaliada pelo algoritmo “Fast Fourier Transform”) da série temporal e $Y^*(\omega)$ é o conjugado de $Y(\omega)$. Este procedimento conduz normalmente a estimativas espectrais muito irregulares. Uma forma de alcançar estimativas alisadas ($\tilde{S}_{YY}(\omega)$) consiste em dividir a série temporal em troços, calcular a FFT de cada troço e realizar a média das FFT obtidas. Neste processo pode existir alguma sobreposição entre troços consecutivos, designando-se esta sobreposição por “overlapping”, a qual pode atingir valores até 60% sem prejudicar os resultados. Antes da aplicação da FFT a cada troço temporal, este deverá ser multiplicado por um janela de dados para diminuir os erros de “leakage”. Existem vários tipos de janelas (Hanning, cosine-taper, Welch, Parzen, etc.), sendo no entanto a janela de Hanning a que é mais correntemente usada no contexto dos ensaios de vibração ambiental.

As funções densidade espectral cruzadas são estimadas de forma análoga, mas considerando a multiplicação da FFT de uma das respostas pelo conjugado da FFT da outra. Ao contrário dos espectros de potência, as funções densidade espectral cruzadas são funções complexas.

A partir dos espectros de potência normalizados é calculado o espectro de potên-

cia médio normalizado, sobre o qual se podem identificar as frequências próprias da estrutura, bastando para tal seleccionar os picos. As amplitudes e fases das funções de transferência, relacionando a resposta em cada um dos pontos instrumentados da estrutura com a do ponto de referência, e as funções de coerência, são armazenadas em matrizes de dimensão $nf \cdot ns$, sendo nf o número de pontos que definem as funções e ns o número de pontos instrumentados.

A rotina *posteva* exporta as matrizes anteriores para o Excel, onde, de forma automática, a partir de uma geometria previamente definida para a estrutura, são desenhados, para a frequência desejada (uma das frequências próprias da estrutura), os gráficos de variação da amplitude da função de transferência, da fase respectiva e da coerência ao longo da estrutura. A amplitude e a fase da função de transferência conduzem ao traçado dos modos, proporcionando a coerência uma ideia do erro associado à estimativa de cada ordenada modal.

O programa apresentado faz parte de um conjunto mais alargado de funções elaboradas em Matlab (Magalhães 2004), onde se incluem rotinas para aplicação do Método de Decomposição no Domínio da Frequência e do Método de Identificação Estocástica em Sub-espacos a partir das Correlações, que permitem a análise de estruturas com diferentes níveis de complexidade.

5 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO


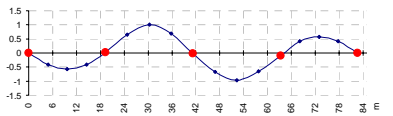
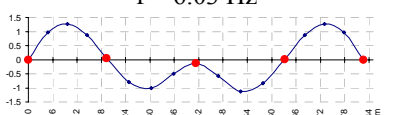
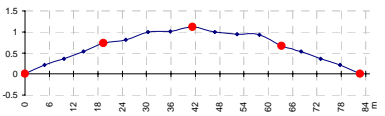
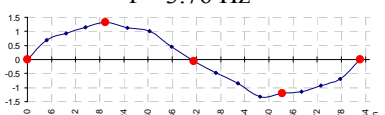

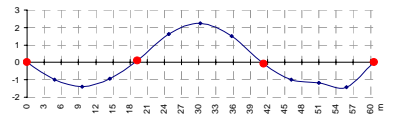
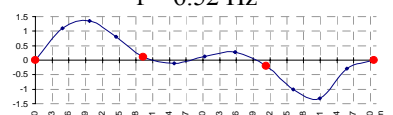
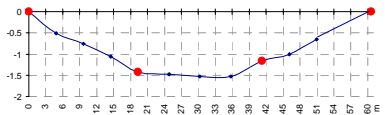
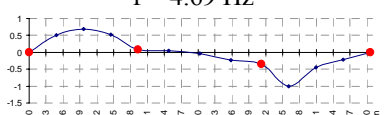

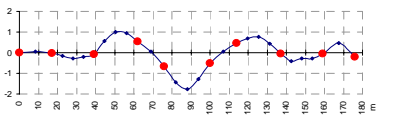
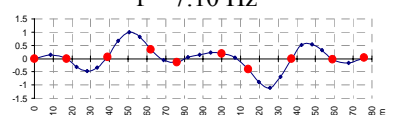
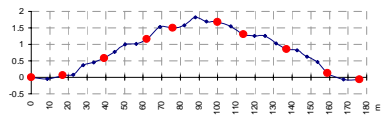
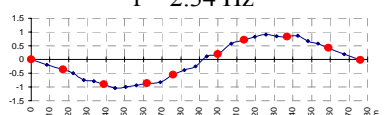

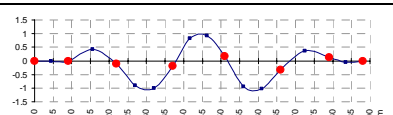
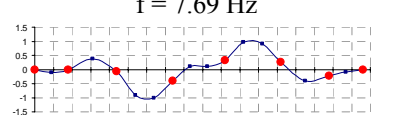
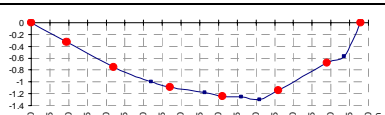
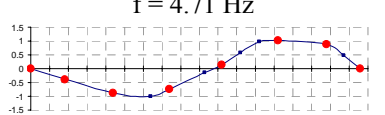

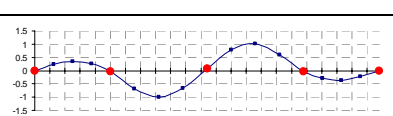
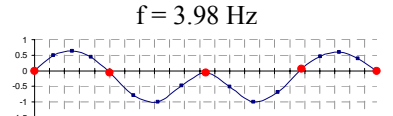
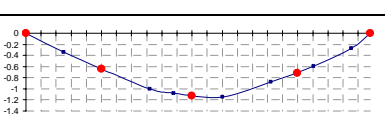
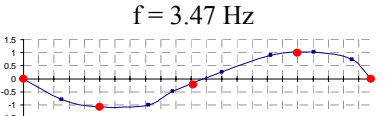
A metodologia descrita foi aplicada no ensaio de 7 viadutos ferroviários da Linha Porto-Braga e da Linha Porto-Guimarães. No Quadro I são descritas de forma sucinta as estruturas ensaiadas e são apresentados os principais resultados extraídos das séries temporais recolhidas através do método da selecção de picos. Na representação das configurações modais, os modos verticais são representados em alçado e os modos transversais em planta, sendo usado o símbolo ● para marcar os pontos de ligação do tabuleiro aos pilares.


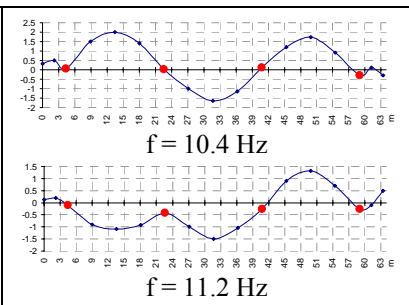
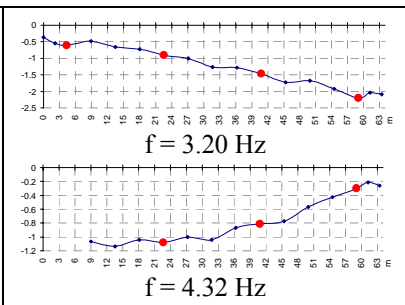

A análise de duas das obras ensaiadas é apresentada de forma mais detalhada para melhor exemplificar os procedimentos

usados e para evidenciar a boa correlação entre os resultados experimentais e os cor-

respondentes valores obtidos através de modelos numéricos.

Quadro I – Resumo dos resultados obtidos para todas as estruturas ensaiadas

Descrição da Estrutura	Modos Verticais	Modos Transversais
 Linha Porto – Guimarães Viaduto V2 Vãos: 19.3-22-22-19.3 m Altura da secção: 1.3m	 $f = 6.03 \text{ Hz}$  $f = 7.52 \text{ Hz}$	 $f = 3.76 \text{ Hz}$  $f = 6.27 \text{ Hz}$
 Linha Porto – Guimarães Viaduto Acesso à P. Caniços Vãos: 19.3-22-19.3 m Altura da secção: 1.3m	 $f = 6.52 \text{ Hz}$  $f = 8.33 \text{ Hz}$	 $f = 4.69 \text{ Hz}$  $f = 8.94 \text{ Hz}$
 Linha Porto – Guimarães Ponte de Caniços Vãos: 17-22-30-38-30-22-17m Altura da secção: 2.2m	 $f = 7.10 \text{ Hz}$  $f = 8.57 \text{ Hz}$	 $f = 2.34 \text{ Hz}$  $f = 2.59 \text{ Hz}$
 Linha Porto – Guimarães Viaduto em Guimarães Vãos: 9-12-15-14-13-9m Altura da secção: 0.8m	 $f = 7.69 \text{ Hz}$  $f = 8.60 \text{ Hz}$	 $f = 4.71 \text{ Hz}$  $f = 9.18 \text{ Hz}$
 Linha Porto – Braga Viaduto V1 Vãos: 25-32-32-25m Altura da secção: 1.8m	 $f = 3.98 \text{ Hz}$  $f = 5.20 \text{ Hz}$	 $f = 3.47 \text{ Hz}$  $f = 5.47 \text{ Hz}$

 <p>Linha Porto – Braga Viaduto de Nine Vãos: (13.7-18.2-18.2-4.4)+ +5x(4.4-18.2-18.2-4.4)+ +(4.4-18.2-18.2-13.7) m Altura da secção: 1.5m</p>	 <p>Configurações modais do 2º segmento do tipo 4.4-18.2-18.2-4.4 m</p>	 <p>Configuração modal do 2º segmento do tipo 4.4-18.2-18.2-4.4 m</p>
 <p>Linha Porto – Guimarães Viaduto V1 Vãos: 28 vãos de 6m Altura da secção: 0.6m</p>	<p>Nesta estrutura apenas foram realizadas medidas em três secções para identificar o valor da primeira frequência vertical e transversal.</p> <p>1ª frequência vertical: 15 – 16Hz 1ª frequência transversal: 5 – 6Hz</p>	

5.1 - Viaduto V2

O tabuleiro do viaduto V2 da Linha Porto - Guimrães é constituído por quatro tramos, dois intermédios e dois extremos, possuindo respectivamente um desenvolvimento de 22,0 e 19,30 m entre eixos de apoio, que são vencidos através de uma laje aligeirada de betão armado pré-esforçado com a secção transversal representada na Fig 2. Os apoios intermédios do tabuleiro são materializados por pares de pilares de secção maciça e rectangular, solidarizados por duas travessas de betão armado, colocadas a meia altura e no seu topo. As fundações dos pilares são realizadas através de sapatas, que se encontram aproximadamente 5 metros abaixo da superfície do aterro posteriormente realizado.

Nesta estrutura, os modos de torção não são relevantes, pelo que apenas foram realizadas medições ao longo de um alinhamento longitudinal junto a um dos guarda balastro. Na Fig 3 são indicadas as posições dos pontos instrumentados. Após consulta do modelo numérico, previamente desenvolvido, foi seleccionada a secção 6 para referência.

O ensaio de vibração ambiental foi realizado antes da entrada em serviço do viaduto e num dia de sol em que o vento era praticamente imperceptível, pelo que o

nível de resposta medida foi muito baixo, como se pode constatar através da série temporal representada na Fig 4.

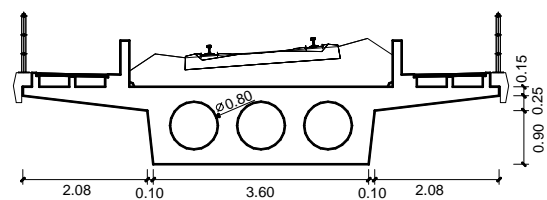


Fig 2 – Secção transversal do tabuleiro a meio vão

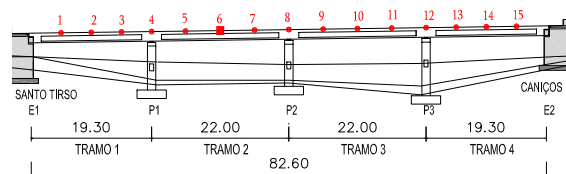


Fig 3 – Pontos instrumentados

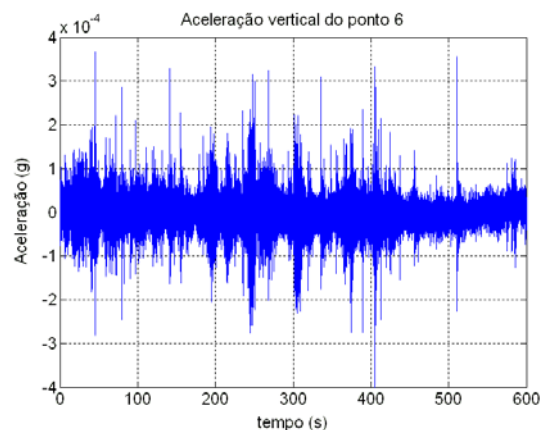


Fig 4 – Série temporal de aceleração vertical colhida na secção de referência

Na Fig 5 são representados os espectros normalizados médios relativos à direcção vertical e transversal, onde são identificadas as frequências naturais da estrutura.

Para preparação do ensaio e confronto com os resultados experimentais foi desenvolvido um modelo numérico de barras da estrutura, com base no projecto do viaduto. No Quadro II, as configurações modais e as frequências dos primeiros modos de vibração calculados são comparadas com as obtidas experimentalmente. Desta comparação, verifica-se que as configurações modais são praticamente coincidentes, contudo constata-se que as frequências do modelo são significativamente superiores às frequências experimentais. Esta diferença é justificada pelos seguintes aspectos: a massa do balastro foi calculada com base em dados de projecto, sendo estas estimativas obviamente conservativas; o módulo de elasticidade do betão adoptado foi o correspondente ao valor médio aos 28 dias, sendo expectável que o betão utilizado tenha uma resistência superior, devendo ainda ter-se em conta o natural endurecimento do betão até ao dia da realização do ensaio; finalmente, não

foram considerados na modelação 5 metros de aterro colocados acima da cota das sapatas, facto que naturalmente aumenta a rigidez transversal da estrutura, levando a um incremento das frequências dos modos transversais.

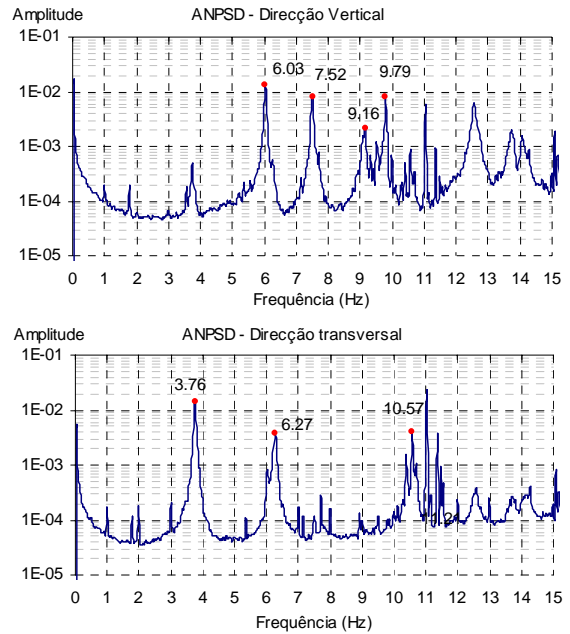


Fig 5 - Espectros de potência normalizados médios.

Quadro II – Comparação entre resultados experimentais e numéricos (Viaduto V2)

	Modos Experimentais	Modos Numéricos
Modos de Flexão Vertical	 f = 6.03 Hz	 f = 5.14 Hz
	 f = 7.52 Hz	 f = 6.47 Hz
	 f = 9.16 Hz	 f = 8.10 Hz
Modos de Flexão Transversal	 f = 3.76 Hz	 f = 3.08 Hz
	 f = 6.27 Hz	 f = 5.26 Hz

5.2 - Ponte de Caniços

A Ponte de Caniços, que também integra a linha Porto – Guimarães, possui tabuleiro com uma secção transversal em caixão, realizada com altura constante, cujas características geométricas a meio do vão central são representadas na **Fig 6**. A ligação dos pilares centrais ao tabuleiro é monolítica e realizada através dos elementos inclinados visíveis na fotografia da ponte apresentada no Quadro I. Os restantes apoios do tabuleiro são realizados por aparelhos de apoio em panela. As distâncias entre eixos de pilares indicadas a partir de um dos encontros são as seguintes: 17m, 22m, 30m, 38m, 30m, 22m e 17m.

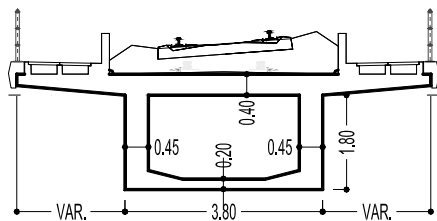


Fig 6 - Secção transversal do tabuleiro a meio vão

No ensaio de vibração ambiental desta estrutura foram recolhidas séries temporais de aceleração em 27 pontos do tabuleiro, dispostos segundo um alinhamento longitudinal junto a um dos guarda balastro (**Fig 8**). Para referência, foi seleccionada a secção 8, tendo a medição nas outras secções sido efectuada através de 9 “setups”. Em cada “setup”, foram recolhidas séries temporais com a duração de 10 minutos, que permitiram a obtenção dos espectros normalizados médios representados na **Fig 7**, com uma resolução em frequência de 0.024 Hz, os quais possibilitaram a identificação das principais frequências naturais da estrutura.

No Quadro III são apresentados os modos experimentais e os modos numéri-

cos. Os modos numéricos resultaram de um modelo de elementos finitos realizado no âmbito do ensaio estático da estrutura (Costa et al. 2005), com base em informação contida na memória de cálculo.

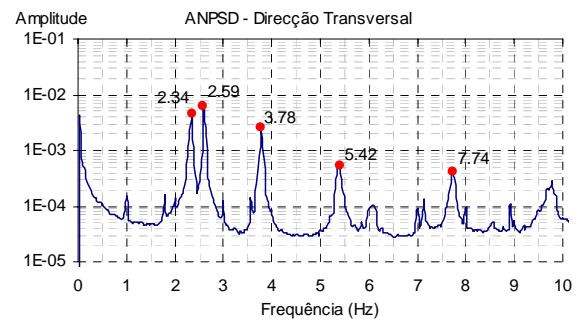
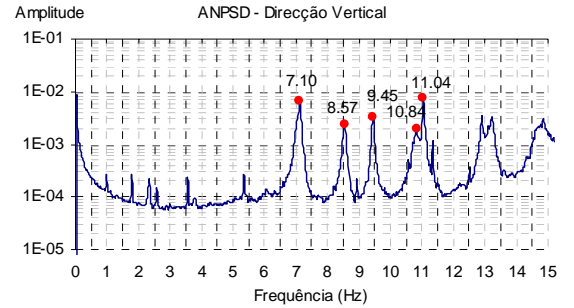


Fig 7 - Espectros de potência normalizados médios.

Também neste viaduto as configurações modais experimentais relativas a modos de flexão vertical e transversal são praticamente coincidentes com as numéricas. As frequências observadas são ligeiramente superiores em relação às calculadas com base nos elementos da memória de cálculo, sendo as diferenças encontradas para os modos verticais justificadas pelos mesmos aspectos que foram referidos para o Viaduto V2. Em relação ao modos transversais, as diferenças também são justificadas pela existência de um apoio sobre o pilar P2, deslizante na direcção transversal, que, para os baixos níveis de excitação da estrutura durante a realização do ensaio funcionou como um apoio fixo (o primeiro modo experimental transversal é simétrico).

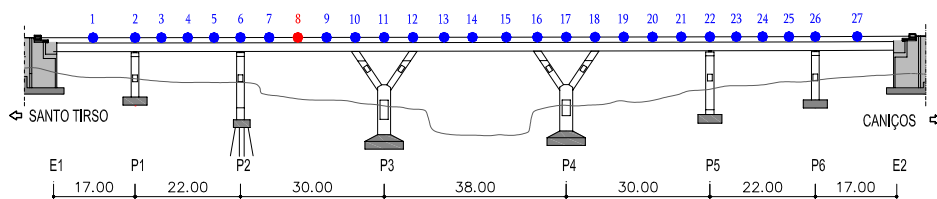
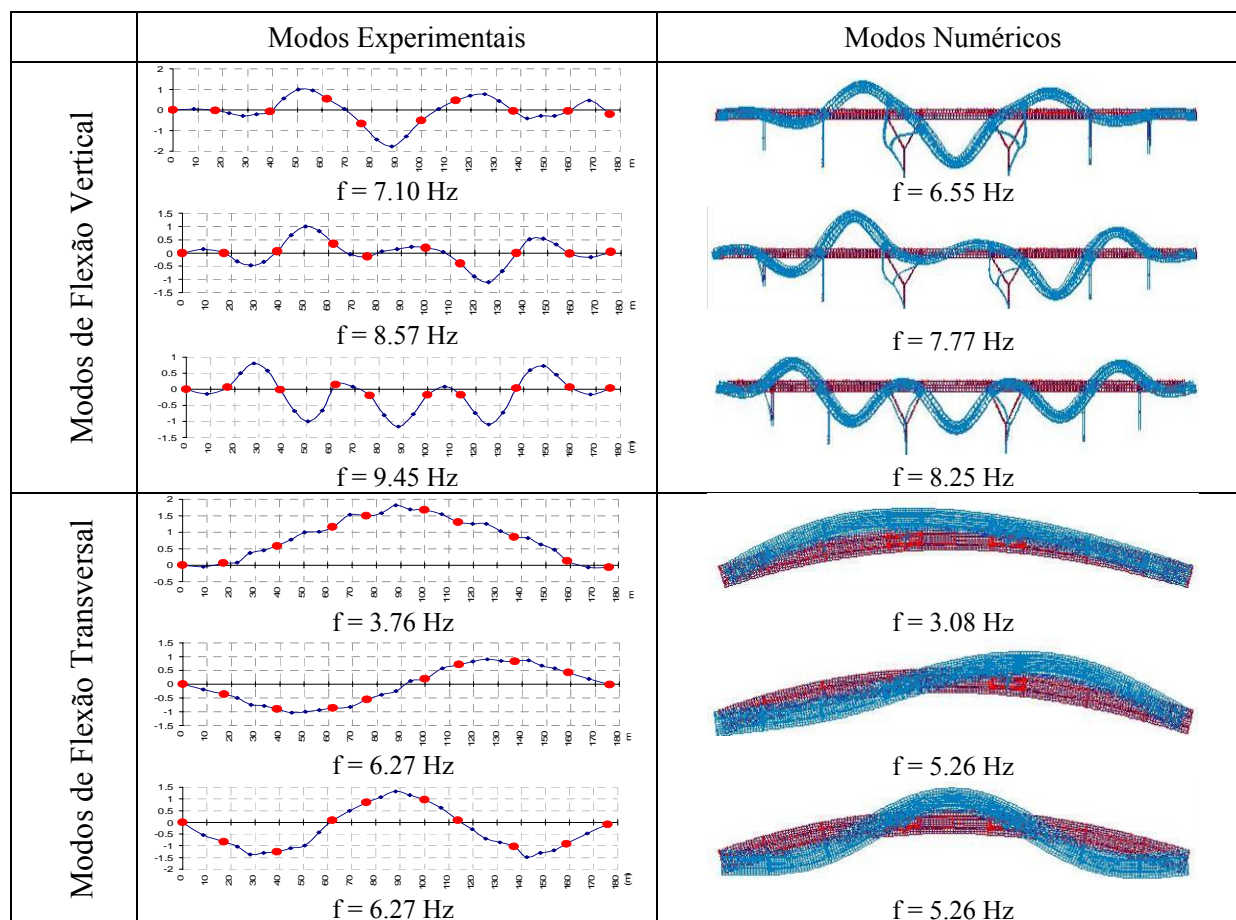


Fig 8 - Pontos Instrumentados

Quadro III – Comparação entre resultados experimentais e numéricos (Ponte de Caniços)



6 - CONCLUSÕES

A metodologia apresentada permite de forma rápida obter uma estimativa rigorosa dos parâmetros modais de viadutos ferroviários.

O equipamento utilizado e as técnicas de identificação aplicadas permitem obter bons resultados, mesmo em estruturas relativamente rígidas, onde o nível de sinal registado é muito baixo.

Os parâmetros modais estimados são adequados para ajustar os modelos numéricos desenvolvidos na fase de projecto e para estabelecer uma caracterização dinâmica que poder servir como referência para posteriores avaliações da condição estrutural.

7 - REFERÊNCIAS

Brincker, R.; Zhang, L. ; Andersen, P. (2000) - *Modal Identification from Ambient Responses Using Frequency Domain Decomposition*, IMAC XVIII, San Antonio, USA.

Costa, B.; Felix, C.; Figueiras, J. (2005) - *Instrumentação e Observação do Comportamento da Ponte de Caniços durante o Ensaio de Carga*, Relatório Técnico, Labest, FEUP.

Felber, Andreas Johann (1993) - *Development of a Hybrid Bridge Evaluation System*, PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Magalhães, F. (2004) - *Identificação Modal Estocástica para Validação Experimental de Modelos Numéricos*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Magalhães, F.; Caetano, E.; Cunha, A. (2005) - *Assessment of Dynamic Properties of Guadiana Cable-stayed Bridge based on different Output-only Identification Techniques*, EVACES 2005, Bordeaux, France.

Magalhães, F.; Caetano, E.; Cunha, A. (2006) - *Operational Modal Analysis of the Braga Sports Stadium Suspended Roof*, IMAC XXIV, St. Louis, Missouri, USA.

Peeters, Bart (2000) - *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.