

ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS

Proença*, J. M. S. F. M.; Branco**, F. A.; Azevedo**, J. J. R. T.

* Assistente. Instituto da Construção, DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal.

** Professor Associado. Instituto da Construção, DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal.



RESUMO

A medição experimental das vibrações apresentadas pelas estruturas tem-se tornado uma ferramenta cada vez mais frequente no âmbito das técnicas da avaliação estrutural. As metodologias assim definidas podem servir à avaliação dos riscos de dano estrutural assim como do potencial desconforto humano quando as construções são sujeitas a vibrações. Neste artigo abordam-se alguns exemplos de aplicação desta vertente da medição experimental de vibrações, com o destaque para o conjunto de normas internacionais sobre o assunto. Outra das aplicações da medição experimental de vibrações, aqui referenciada, é a Identificação Estrutural, que consiste na determinação de algumas características dinâmicas das estruturas como sejam: as frequências naturais, os coeficientes de amortecimento e as configurações modais, face a condições de vibração ambiente.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação estrutural tem conhecido um número crescente de aplicações em que se faz uso das metodologias de medição de vibrações em estruturas. Com efeito, tem sido grande o desenvolvimento nesta área não só ao nível dos equipamentos propriamente ditos, mas também ao nível das interfaces de comunicação com equipamentos, assim como dos programas de registo e de tratamento de sinal.

Os estudos que adoptam a medição das vibrações nas estruturas resultam, em geral, das seguintes classes de situações:

- Avaliação dos níveis de vibração de forma a garantir o conforto humano;
- Avaliação dos níveis de vibração de forma a garantir a segurança estrutural;

- Identificação estrutural conducente à validação ou aferição de modelos numéricos.

As duas primeiras situações estão habitualmente associadas à existência de uma fonte perturbadora que provoca vibrações mecânicas na estrutura. Nestes casos, o ensaio consiste na medição e identificação das características da resposta estrutural determinante, para a verificação em causa, em termos de vibração mecânica. Este estudo pode, eventualmente, ser complementado pelo estudo de medidas atenuadoras.

As técnicas de identificação dinâmica de sistemas estruturais procuram a quantificação, por via experimental, das variáveis estruturais dinâmicas (frequências

próprias, coeficientes de amortecimento e configurações modais). Estas variáveis, que traduzem o comportamento dinâmico global, são habitualmente utilizadas para aferir modelos numéricos da estrutura esclarecendo desse modo alguns aspectos da modelação sobre os quais hajam dúvidas.

Este artigo descreve alguns exemplos de aplicação das metodologias de medição de vibrações em estruturas, apresentadas de acordo com a classificação anterior. Todos os exemplos apresentados se integram em trabalhos de consultoria em engenharia civil desenvolvidos pelo CMEST, agora Instituto da Construção do IST.

2. EQUIPAMENTO DE ENSAIO

Os ensaios de caracterização dinâmica são feitos com recurso a equipamento de medição, aquisição, registo, processamento e pós-processamento de leituras multi-canal em regime dinâmico. Este sistema é tipicamente composto pelas seguintes unidades:

- Unidade de aquisição de dados;
- Controlador;
- Unidades de medição de vibrações;
- Amplificadores e condicionadores de sinal.

No equipamento disponível no Instituto da Construção - IST, a unidade de aquisição de dados é constituída pelo *Mainframe* (elemento HP3852A propriamente dito), pelo extensor HP3853A e pelos diversos acessórios ligados a estes. Os acessórios disponíveis são o voltímetro HP44701A e os acessórios de extensometria HP44717A e HP44719A. O voltímetro referido efectua a conversão Analógico-Digital do sinal com uma resolução variável entre os 3 1/2 e os 6 1/2 dígitos com o consequente agravamento da taxa máxima de digitalização do sinal. Embora nem sempre tenha sido utilizado nas ensaios descritos em 3 e 4, dispõe-se ainda dum voltímetro rápido HP44704A de 16 bit. A programação das leituras pode ser

efectuada directamente pelo teclado disponível no *Mainframe* ou indirectamente pelo controlador.

O controlador, um micro-computador HP9000 série 300, está dotado dum disco rígido e drive de diskettes de 3 1/2 " (HP9153C). Existe ainda a possibilidade de controlo através dum micro-computador PC 486 através duma placa *HP82335B* e do software *HP-IB for Windows and DOS*.

As unidades de medição de vibrações, B&K 4379 ou HBM SMU 31, são constituídas por transdutores, respectivamente piezoelétricos e electro-dinâmicos, de acelerações ou de velocidades. Estes transdutores adaptam-se particularmente bem à medição de vibrações de fraca intensidade e de baixo conteúdo de frequências, como são as que caracterizam a resposta das estruturas de Engenharia Civil, face a excitações ambientes. Os amplificadores e condicionadores de sinal, respectivamente B&K 2635 e HBM, permitem a integração simples ou dupla, obtendo-se respectivamente velocidades ou deslocamentos permitindo ainda diversos tipos de filtragem analógica (filtragem passa-alto, passa-banda, KB, etc.).

O software desenvolvido no Instituto da Construção - IST, quer para os ensaios de medição de níveis de vibrações quer ainda para os ensaios de identificação de parâmetros modais, consiste essencialmente em três programas: (i) programa de leitura mono ou pluri-canal com gravação em base magnética; (ii) programa de determinação e gravação da densidade espectral de potência de um registo e (iii) programa de combinação de densidades espectrais de potência correspondentes a registos *homólogos*, assim como de determinação de registos *indirectos* (cuja explicação se remete para 4.1).

Relativamente às especificações do presente equipamento refiram-se apenas os seguintes aspectos relacionados com o software desenvolvido:

- Taxa máxima de digitalização. As taxas máximas de digitalização aconselháveis são de 100 e 50 leituras/segundo para

leituras mono e multi-canal respectivamente.

- Frequência mínima. Para o transdutor SMU31 observam-se algumas perdas significativas para frequências inferiores a 1.0 Hz. Para os transdutores Brüel & Kjær type 4379 a frequência mínima é de 0.2 Hz, em registos de acelerações, e de 1.0 Hz em registos de velocidades ou de deslocamentos.

3. MEDIÇÃO DE NÍVEIS DE VIBRAÇÃO

3.1 Considerações gerais

A existência de vibrações mecânicas em estruturas pode gerar dois tipos de problemas:

- i incómodo para os utentes ou ocupantes da estrutura.
- ii danos para a estabilidade da construção.

Ambas as situações se encontram cobertas por regulamentação. As normas ISO 2631[5] e as normas DIN4150/1[6] e DIN 4150/2[7] estabelecem o procedimento para medição de vibrações e definem os níveis toleráveis de vibrações a suportar pelo corpo humano. No que se refere à segunda classe de situações, esta está regulamentada, nacionalmente, através da Norma Portuguesa NP2074[9] e internacionalmente através da norma DIN4150/3[8].

A sensibilidade humana às vibrações mecânicas depende, entre outros, dos seguintes factores[10]: posição, direcção de incidência relativamente ao eixo da espinha dorsal, actividade pessoal (repouso, andamento, etc.), partilha de experiências com outros, sexo e idade, frequência da ocorrência e natureza da atenuação. Já a intensidade da percepção depende da amplitude da vibração (deslocamento, velocidade ou aceleração), duração da exposição e conteúdo de frequências da vibração. As normas DIN 4150/2 definem um parâmetro de intensidade, referenciado por factor KB, que pretende traduzir, através duma ponderação que tem em conta

a sensibilidade humana, a distribuição das vibrações (em termos da amplitude de deslocamento, velocidade e aceleração) na gama dos 1 Hz aos 80 Hz. O valor assim calculado reporta-se directamente a um valor admissível que tem em conta o tipo de edifício, o período (dia/noite) em que ocorrem as vibrações e ainda o carácter de permanência destas. O transdutor de velocidades HBM SMU 31 dispõe dum filtro analógico que permite a obtenção dos valores instantâneos, máximos e RMS do parâmetro KB. O valor assim determinado é comparado com um valor admissível que depende do tipo de construção e do período do dia em que ocorrem as vibrações.

No que respeita à segurança das construções a NP 2074 define o procedimento de medição de vibrações em termos de velocidade e estipula um valor de velocidade, referenciado por velocidade limite v_l , a partir da qual poderão ocorrer danos:

$$v_l = 10\alpha\beta\gamma \quad (3.1)$$

em que os valores de α , β e γ são obtidos através de índices que representam respectivamente o solo de fundação, a natureza da construção e a frequência de solicitação. Este valor de velocidade limite deverá ser superior à velocidade máxima do registo definida através de:

$$v_{max} = \max_t \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} \quad (3.2)$$

em $v_x(t)$, $v_y(t)$ e $v_z(t)$ representam, para um determinado instante, as componentes cartesianas da velocidade medida num determinado ponto da fundação.

Nos parágrafos seguintes exemplificam-se estudos realizados em várias obras com vista à caracterização dos níveis de vibração na perspectiva da verificação da segurança das construções. Têm também sido feitos estudos com vista à verificação do conforto humano que, por questões de concisão, se omitem no presente artigo [11].

3.2 Vibrações Ferroviárias da Ponte de S. João

A ponte de S. João, sobre o rio Douro, insere-se num novo traçado ferroviário que atravessa zonas urbanas densamente ocupadas, incluindo um túnel sob a cidade de Gaia. O projecto desta travessia originou cuidados particulares em relação aos efeitos das vibrações ferroviárias quer nas estruturas próximas, quer em termos de conforto dos habitantes dos edifícios vizinhos.

De modo a reduzir os efeitos das vibrações foi adoptada uma solução de via não balastrada, assente sobre uma laje de betão, sendo os carris fixos sobre um sistema de amortecedores de neoprene, de modo a absorver as vibrações.

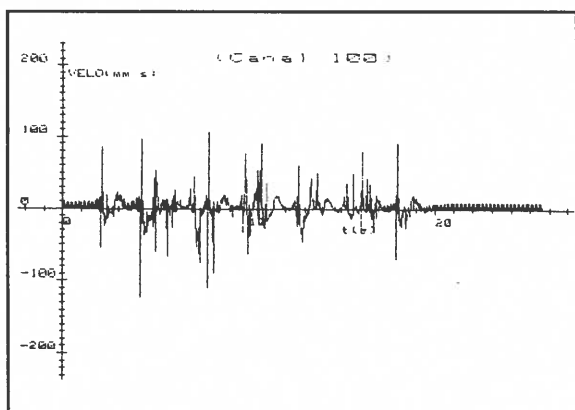


Fig. 3.1 - Registo de vibrações verticais na via com balastro.

Com o objectivo de avaliar o funcionamento deste sistema de via férrea, comparando-o com a solução clássica em balastro, construiu-se inicialmente uma zona de via protótipo, não balastrada, inserida na via ainda em circulação de características balastradas [1]. As características de funcionamento foram avaliadas através da medição das vibrações nos terrenos próximos, em situação de via balastrada e sem balastro, para a passagem dos mesmos combóios.

Nas Figs.3.1 e 3.2 exemplificam-se estas medições, apresentando-se os registos de vibrações verticais, medidas a 0,3m do carril mais próximo, nos dois tipos de via. Pode-se observar que as vibrações com a

via sem balastro são significativamente inferiores. Os valores máximos de velocidade de vibração registados próximos da linha, foram sempre inferiores aos valores admissíveis para estruturas sensíveis ($v_L=3,5\text{mm/s}$).

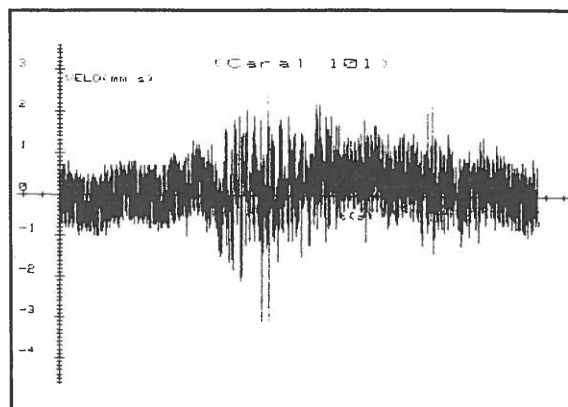


Fig. 3.2 - Registo de vibrações verticais na via sem balastro.

3.3 Mosteiro dos Jerónimos

Por solicitação do então IPPC, o CMEST efectuou em 1990 a observação dos níveis de vibração que se verificavam no Mosteiro dos Jerónimos em resultado do funcionamento do equipamento de cravação de estacas e do trépano, na obra do CCB - Centro Cultural de Belém [2].

As medições são referentes a um bate-estacas (peso de 4 Ton., queda de 0.5 m) colocado no limite da obra do C.C.B. - Centro Cultural de Belém - no alinhamento da fachada do Museu da Marinha. Foram realizados os seguintes dois tipos de medições:

- Medições de registos curto de velocidades correspondentes aos períodos de funcionamento do equipamento de cravação de estacas;
- Medições de registo médio para determinação dos valores máximos, de forma a, por comparação com os registos anteriores, avaliar o agravamento das condições de vibração devidas à cravação de estacas.

As medições foram efectuadas no piso térreo em dois pontos distintos: **A** - junto à porta do Museu da Marinha (a 70 m do bate-estacas) e **B** - no limite do separador central da Av. Bartolomeu Dias (a 17 m do bate estacas).

Conforme especificado nas Normas Portuguesas NP 2074, as medições foram efectuadas no formato de velocidades e reportaram-se às seguintes três direcções ortogonais: **x** - direcção horizontal definida pelo local de ensaios e a posição do equipamento de furação; **y** - direcção horizontal perpendicular à anterior e **z** - direcção vertical.

Apresentam-se nas Figs. 3.3 e 3.4 os registos 5 e 10 correspondentes ao ponto de medição **A** e direcções **x** e **z** respectivamente.



Fig. 3.3 - Registo nº 5.



Fig. 3.4 - Registo nº 10.

Da observação das Figs. 3.3 e 3.4, assim como dos restantes registos aqui omitidos, conclui-se:

- Em **A** os registos obtidos nas três direcções apresentam amplitudes semelhantes embora com uma ligeira predominância das componentes verticais;

- A hierarquia entre as diversas componentes observada em **A** mantém-se em **B**, amplificada, dado a maior proximidade da origem das vibrações;
- As vibrações induzidas pelo equipamento de cravação de estacas não são significativamente diferentes das provocadas por outros equipamentos presentes em obra;
- Os sinais registados apresentam periodicidade de aproximadamente 2s (intervalo entre duas "pancadas" consecutivas).

De acordo com a NP2074 a integridade estrutural seria observada sempre que esta velocidade exceder a *velocidade máxima de registo* v_r observada em ensaio. A velocidade máxima de registo em **A** não excedeu um valor de 0.5 mm/s, estando, por consequência, em conformidade com a NP2074. Refira-se contudo que o nível de vibrações em **B**, local já afastado da estrutura a meia distância entre a fonte de vibrações e o mosteiro, já excede o máximo admissível. Pode-se então inferir que se as estacas fossem cravadas mais perto do mosteiro, nomeadamente em **B**, já o nível de vibrações na estrutura seria eventualmente superior ao máximo admissível.

4. IDENTIFICAÇÃO DINÂMICA DE ESTRUTURAS FACE À EXCITAÇÃO AMBIENTE

4.1 Considerações gerais

Fundamentação analítica - Supondo que a excitação verifica algumas condições relativas à sua regularidade e ainda que o sistema estrutural se comporta linearmente, os espectros de potência da excitação $([S_{ff}]_{(\omega)})$ e da resposta $([S_{xx}]_{(\omega)})$ encontram-se relacionados através da matriz-função (complexa) de transferência $[H]_{(\omega)}$.

$$[S_{xx}]_{(\omega)} = [H]_{(\omega)} [S_{ff}]_{(\omega)} [H]_{(\omega)}^{*T} \quad (4.1)$$

Considerando ainda que a excitação é um processo estocástico estacionário de banda larga (designado por *ruído branco*), o espectro de potência da excitação é do tipo:

$$[S_{ff}]_{(\omega)} = \sigma^2 [I] \quad (4.2)$$

em que σ^2 é a variância do processo. Nas condições anteriores, o espectro de potência da resposta é dado por

$$[S_{xx}]_{(\omega)} = \sigma^2 [H]_{(\omega)} [H]_{(\omega)}^{*T} \quad (4.3)$$

em que os sobrescritos $*$ e T referenciam, respectivamente, a matriz conjugada e a matriz transposta. Esta equação permite concluir que o espectro de potência da resposta apresenta uma dependência da frequência de excitação semelhante à apresentada pela matriz-função de transferência. Esta dependência da matriz-função de transferência face à frequência da excitação decorre directamente da seguinte equação:

$$H_{mn}(\omega) = \sum_{k=1}^N \frac{\Phi_{mk} \Phi_{nk}}{\omega_k^2 + i2\zeta_k \omega_k \omega - \omega^2} \quad (4.4)$$

sendo Φ_{mk} , ω_k e ζ_k respectivamente o elemento genérico da matriz de configurações modais, a frequência própria de ordem k e o coeficiente de amortecimento modal de ordem k .

A dependência da frequência de excitação que decorre da equação 4.4 traduz uma das propriedades mais relevantes da identificação dinâmica de estruturas face à excitação ambiente, ou seja, o espectro de potência da resposta apresenta "picos" na vizinhança das frequências próprias sempre que, para o modo de vibração em causa, a configuração modal tenha termos não nulos para os pontos de registo.

Na prática, a série contínua no tempo que descreve a resposta é substituída por uma série discreta no tempo correspondente à amostragem da primeira para instantes afastados de Δt . O espectro de potência duma série estocástica discreta no tempo é a série discreta na frequência que se relaciona com a transformada de Fourier da primeira através de:

$$S_{xx}(\omega_n) = \frac{X_n^* X_n}{T} \quad (4.5)$$

em que $S_{xx}(\omega_n)$ e X_n representam o espectro de potência da resposta e a transformada discreta de Fourier para a n -ésima frequência, em que T é a duração da série no tempo.

Rotinas de processamento e de pós-processamento de sinal - As rotinas de processamento implementadas foram concebidas de acordo com os seguintes objectivos: (1) eliminar as componentes da série discreta no tempo que são consideradas espúrias para as configurações modais em estudo e (2) determinar as correspondentes estimativas espectrais cujos "picos", quando consistentes em registos equivalentes, correspondem às frequências próprias da estrutura. Estas rotinas de processamento permitem as seguintes operações:

1. Afectação da série temporal numa janela no domínio do tempo. Esta operação valida as hipóteses da transformação discreta de Fourier nomeadamente no que se refere à periodicidade do registo. Dispõe-se para o efeito de janelas de Hanning, Cosine-taper e exponenciais;
2. Anulamento da média do registo;
3. Determinação das estimativas espectrais da resposta;
4. "Amaciamento" das estimativas espectrais.

Dentro dos efeitos imputáveis à discretização no tempo que mais erros provocam, destacam-se o efeito de *aliasing* e o efeito de *leakage*. O primeiro é corrigido quer através da filtragem passa-baixo do sinal, anteriormente à

discretização, quer ainda através da adopção de elevadas taxas de discretização (da ordem dos 100 Hz com o voltímetro que presentemente se dispõe). O último efeito é corrigido através da afectação da série discreta no tempo por uma janela anti-*leakage* (como as referidas anteriormente).

No que respeita às técnicas de pós-processamento foram implementadas as seguintes duas:

- i. Combinação, no domínio da frequência, das estimativas espectrais para registos diferentes, mas *homólogos*.
- ii Combinação, no domínio do tempo, de dois registos *homólogos*, por forma a obter os designados registos *indirectos*.

Dois registos dizem-se homólogos quando apresentam igual taxa de digitalização, igual tipo de grandeza medida (aceleração, velocidade ou deslocamento) e igual duração. A primeira técnica de pós-processamento consiste na soma, ou produto, das estimativas espectrais obtidas após as técnicas de processamento atrás enumeradas. Esta técnica acentua os "picos" que aparecem consistentemente nos diversos registos atenuando os picos, possivelmente espúrios, que aparecem apenas nalguns registos. A última técnica enumerada permite, através de simples operações algébricas, determinar registos indirectos que, por hipótese, apenas contêm determinadas componentes cinemáticas do movimento. O processamento destes registos indirectos permite a identificação das frequências das configurações modais que envolvem as componentes cinemáticas seleccionadas.

4.2 ENSAIO DE IDENTIFICAÇÃO DINÂMICA DA PONTE DO GUADIANA

A ponte do Guadiana em Vila Real de St. António é uma estrutura com um vão central de 324m e dois vãos laterais de 135m, apresentando um tabuleiro em

caixão pré-esforçado monocelular e torres em forma de A.

O comportamento sísmico da ponte foi analisado, durante a fase de projecto, recorrendo a modelos de elementos finitos tridimensionais, utilizando elementos de barra tridimensional (6 g.d.l. por nó). Para aferir os valores numéricos obtidos, o CMEST e o LNEC, realizaram durante os ensaios de carga, ensaios dinâmicos de modo a obter experimentalmente as frequências e modos de vibração [3] da ponte.

Para estes ensaios a estrutura foi instrumentada em várias secções com transdutores de deslocamentos, velocidades e acelerações. As medições foram feitas tendo por excitação a acção do vento, a passagem de camiões ou a suspensão (e consequente libertação brusca) de um peso calibrado.

O modelo numérico inicial apresentava as frequências próprias muito próximas, existindo cerca de 30 modos de vibração com frequências inferiores a 3 Hz. Este efeito, associado à interacção entre o tabuleiro e os cabos permitiu que apenas se pudessem identificar experimentalmente alguns dos modos importantes mais baixos. Nas Figs. 4.1 e 4.2 exemplifica-se esta análise, mostrando-se os registos espectrais dos deslocamentos verticais a meio vão em bordos opostos, adicionados e subtraídos, respectivamente. Estes registos indirectos representam, respectivamente, as componentes de flexão e de torção da secção de meio vão.

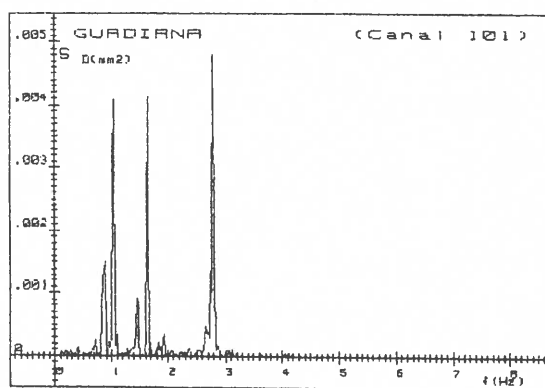


Fig 4.1 - Densidade espectral de potência do registo 41 soma.

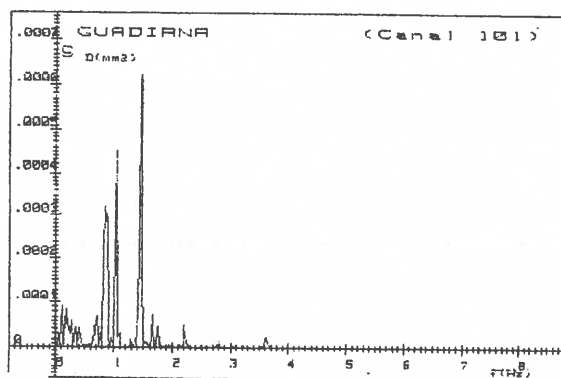


Fig 4.2 - Densidade espectral de potência do registo 41 subtracção.

A análise dos registos obtidos permitiu obter as seguintes conclusões:

- Os picos correspondendo a 1,64Hz e 2,78Hz são visíveis apenas nos registos indirectos de soma, pelo que são modos de flexão;
- Os restantes picos (frequências 0,85, 1,04 e 1,45 Hz) correspondem a modos envolvendo interacção de flexão-torção.

A partir do afastamento entre os pontos de meia potência dos vários picos do espectro obtido, estimaram-se para a ponte do Guadiana os amortecimentos modais em 1,23%, 1,17% e 0,62% para os três modos verticais mais baixos. Note-se que o último valor muito baixo é certamente uma consequência do acoplamento com a frequência própria de um dos cabos, reflectindo essencialmente o amortecimento do cabo e não o do modo de vibração.

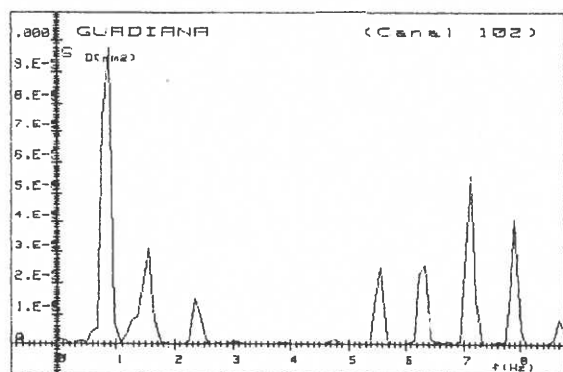


Fig 4.3 - Densidade espectral de potência do registo4 cabo a meio vão.

O coeficiente de amplificação dinâmica c foi também estimado recorrendo à medição dos deslocamentos verticais a meio vão, correspondentes à passagem de camiões com as velocidades de 15 e 30km/h. Na ponte do Guadiana obtiveram-se valores de $c=1.067$ e $c=1.031$ com ressalto e sem ressalto, respectivamente, para a passagem de um camião a uma velocidade de 30km/h.

Os registos do CMEST centraram-se também no estudo das vibrações dos tirantes sob a acção do vento. Foram feitos vários registos com acelerómetros fixos aos cabos. Na fig.4.3 apresenta-se o registo, no domínio da frequência, relativo ao tirante nº1 localizado a meio vão. Como se observa, o tirante apresenta frequências próprias igualmente espaçadas com um intervalo de 0.78Hz. A frequência teórica para o modo de ordem n num cabo é dada, analiticamente, por

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{m}} \quad (4.6)$$

em que L , F e m representam, respectivamente, o comprimento do cabo, a força aplicada e a massa por unidade de comprimento. O Quadro 4.1 traduz a concordância entre os valores analíticos e experimentais para os diversos tirantes

Quadro 4.1 - Frequências dos tirantes. Analítico e Experimental

Cabo	Força	L	m	f	fexper.	
	KN	m	Ton/m	anal.	Norte	Sul
1	4817	170.2	0.073	0.755	0.78	0.78
3	3086	152.2	0.050	0.824	0.85	0.85
5	2871	134.6	0.050	0.899	0.9	0.9
7	2736	117.4	0.050	1.006	1.03	1.02
9	2417	100.4	0.041	1.208	1.27	1.25
11	2092	84.1	0.033	1.494	1.55	1.52
13	1727	68.9	0.029	1.766	1.9	1.9
15	1363	55.5	0.029	1.948	2.1	2.15

Como se observa, existe uma assinalável concordância entre os valores

experimentais e os valores analíticos (determinados com base nos valores de projecto das forças dos tirantes).

Outro dos aspectos principais da campanha de medições nos tirantes foi a observação da interacção entre a vibração do tabuleiro e dos tirantes. A excitação do tabuleiro por acção do vento leva a uma interacção com alguns dos tirantes devido ao movimento dos apoios inferiores.

Este efeito é particularmente visível nas Figs.4.4 e 4.5 que ilustram, respectivamente, os registos simultâneos de deslocamentos a meio vão no tabuleiro e no cabo adjacente.

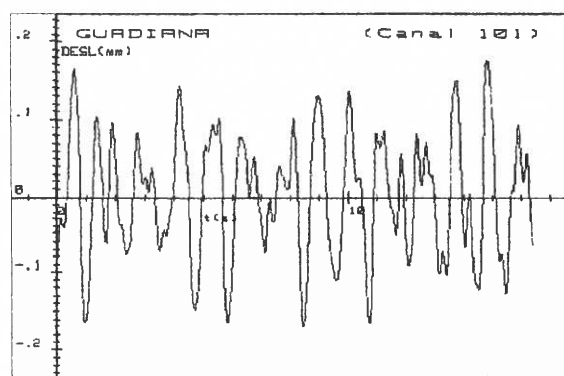


Fig.4.4 - Registro 1.8 (vertical, meio vão, tabuleiro).

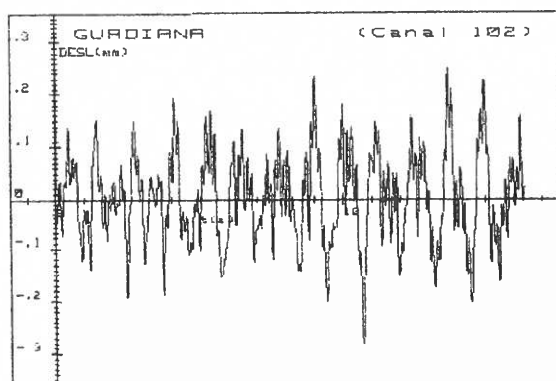


Fig.4.5 - Registro 2.8 (vertical, meio vão, tirante).

Como se pode observar, existe uma grande semelhança no andamento destes registos. A importância do fenómeno de interacção entre o tabuleiro e os tirantes torna-se determinante em situações, como esta, em que as frequências do tabuleiro não diferem significativamente das frequências dos tirantes.

4.3 O VIADUTO DE ALCÂNTARA

A estrutura do Viaduto de Alcântara, de acesso à Ponte 25 de Abril, é constituída por 14 tramos sendo, cada tramo, constituído por um pilar duplo com tabuleiro em consola para ambos os lados. A ligação entre dois tramos consecutivos, cujo comprimento médio é de 76 m, é assegurada por juntas em rótula a meio vão. O tabuleiro apresenta dois caixões de inércia variável interligados por uma laje. Os dois pilares de cada apoio são quadrangulares, ocos, estando interligados por uma travessa intermédia. As fundações são directas.

O estudo da adaptação do Viaduto de Alcântara para a instalação da via férrea na Ponte 25 de Abril e o deficiente funcionamento de algumas juntas nos meio vãos, levou à realização de um conjunto de ensaios de avaliação estrutural com os seguintes objectivos [4]:

- i Determinar os deslocamentos absolutos dos tabuleiros nos bordos das juntas;
- ii Caracterizar a resposta dinâmica dos tabuleiros (incluindo registos com vibração ambiente), de modo a calibrar os modelos numéricos a utilizar no projecto.

O primeiro dos objectivos não se enquadra nas metodologias em estudo pelo que aqui não é desenvolvido.

Os ensaios de caracterização dinâmica consistiram na determinação das frequências naturais mais baixas a par da obtenção de alguma informação qualitativa sobre as configurações modais correspondentes.

Os acelerómetros foram colocados no lado jusante e montante da junta de dilatação que separa o tramo em questão do tramo que contém o pilar 16. Os registos obtidos são essencialmente de dois tipos: (i) leitura mono-canal (indiferentemente a jusante ou montante) e (ii) leitura simultânea dos dois canais (jusante e montante). Todos os registos se referem a vibrações na direcção vertical correspondentes a vibrações ambientes e às

passagens do veículo de carga em ambos os sentidos.

A frequência de Nyquist, frequência até à qual se determinam as estimativas espectrais, é de 50, 25 e de 16.7 Hz, respectivamente para os registos cujo intervalo de digitalização é de 0.01, 0.02 e 0.03 s. A resolução das estimativas espectrais no domínio da frequência é de 0.0488, 0.0326, 0.0244 e 0.0163 Hz, respectivamente para os registos cuja duração é 20.48, 30.72, 40.96 e de 61.44 s.

Numa primeira fase determinaram-se as estimativas das densidades espectrais de potência da resposta em todos os registos directos. Para tal procedeu-se ainda, no domínio do tempo, ao anulamento da média individual de cada registo e afectação deste por uma "janela" anti-*leakage* de Hanning. Sucedeu-se o cálculo das transformadas discretas de Fourier e subsequente determinação das densidades espectrais de potência. A título de exemplo observe-se a Fig. 4.6 que contem o resultado deste tratamento no caso do registo PST 8-Jusante.

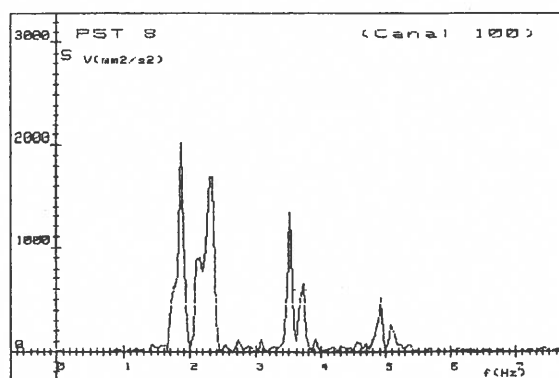


Fig. 4.6 - Densidade espectral de potência do registo PST 8 - Jusante.

O pós-processamento que se seguiu compreendeu as seguintes etapas:

- Determinação e processamento dos registos indirectos.
- Combinação das estimativas espectrais correspondentes a registos homólogos.

No caso vertente, os registos indirectos consistem da soma e diferença, no domínio do tempo, dos registos

efectuados simultaneamente em dois canais (jusante e montante) e pretendem individualizar as componentes de flexão e de torção do tabuleiro. Desta forma se classificaram os "picos" existentes na Fig. 4.6 como correspondentes a modos de torção ou de flexão do tabuleiro.

As combinações das densidades espectrais de registos homólogos consistem simplesmente em somatórios ou piatórios de um conjunto de estimativas de registos directos com determinadas afinidades. Observem-se, para o efeito, as Figs. 4.7 e 4.8 que ilustram o somatório das estimativas dos registos PST 1 a 3 (jusante e montante) e o piatório das estimativas indirectas de soma dos registos PST 24 a 26, respectivamente.

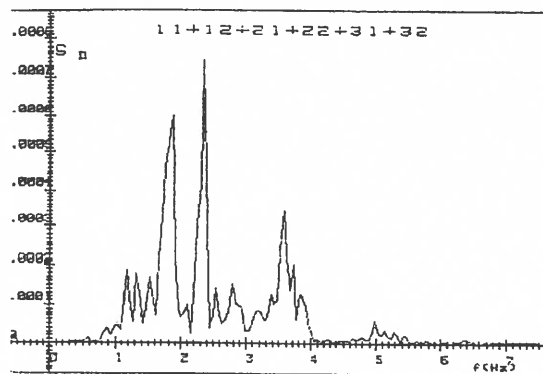


Fig. 4.7 - Somatório das estimativas espectrais dos registos 1, 2 e 3.

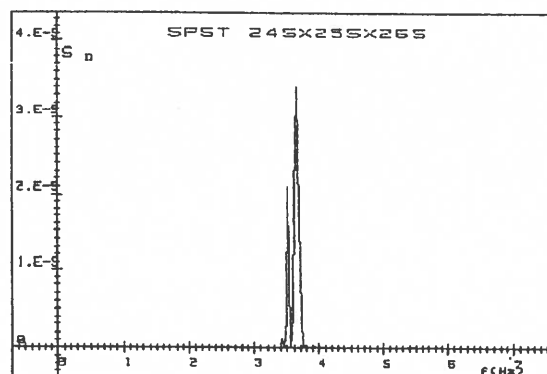


Fig. 4.8 - Piatório das estimativas espectrais dos registos soma PST 24 a 26.

Após a observação consistente dos resultados do tratamento dos registos directos, indirectos e da combinação de registos homólogos, identificaram-se diversas frequências assim como as

respectivas tipologias modais Nesta identificação foi levado em conta que os modos com frequência mais baixa são mais aparentes em registos de deslocamentos do que de velocidades ou de acelerações. Idênticamente, os modos de frequências mais elevadas evidenciam-se melhor nos registos de acelerações do que de velocidades ou de deslocamentos. Refira-se que não foram identificados modos com frequências inferiores a 1 Hz dadas as características dos acelerómetros disponíveis.

5. CONCLUSÕES

Os métodos experimentais de medição de vibrações permitem nas situações de desconforto ou de eventuais danos para as estruturas, caracterizar a fonte de vibração, avaliando a gravidade da situação. Por outro lado estes métodos permitem utilizar as técnicas de identificação dinâmica de sistemas estruturais onde se quantificam por via experimental os parâmetros estruturais dinâmicos. Estes valores são utilizados para aferir modelos numéricos da estrutura, já que estão associados ao seu comportamento dinâmico global.

REFERÊNCIAS

- [1] Branco, F. A.; Cachadinha, M.: *Revision and Technical Assistance of the S. João Bridge Project*; Structural Engineering International Journal, nº 4/92, pp. 268-272, IABSE - Intern. Assoc. for Bridge and Structural Engineering, Zurich, 1992.
- [2] Proença, J. ; Azevedo, J.; Branco, F. A: *Análise de Níveis de Vibração em Monumentos Nacionais*: - Actas das 2ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, GPEE - Grupo Português de Engenharia de Estruturas, Lisboa, 1990.
- [3] Branco, F. A.; Azevedo, J.; Correia, M.; Costa, A.: *Dynamic Analysis of the International Guadiana Bridge*; Structural Engineering International Journal, nº 3/93, pp. 240-244, IABSE - Intern. Assoc. for Bridge and Structural Engineering, Zurich, 1993.
- [4] Branco, F.; Proença, J.; Azevedo, J. - *Viaduto de Alcântara da Ponte 25 de Abril. Ensaio de Caracterização Experimental do Comportamento das Juntas. 2ª Fase - Ensaio de Carga*. Rel. CMEST EP 3/94, 1994.
- [5] International Standards Organization: *Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration*, ISO 2631, Geneva, 1985-1989.
- [6] Deutsches Institut für Normung: *Vibrations in Building; Principles, Predetermination and Measurement of the Amplitude of Oscillations*, DIN 4150/1, Berlin, 1975.
- [7] Deutsches Institut für Normung: *Vibrations in Building; Influences on Persons in Buildings*, DIN 4150/2, Berlin, 1975.
- [8] Deutsches Institut für Normung: *Vibrations in Building; Effects on Structures*, DIN 4150/3, Berlin, 1986.
- [9] Direcção Geral de Qualidade: NP2074 - *Avaliação da Influência em Construções de Vibrações Provocadas por Explosões ou Solicitações Similares*, Lisboa, 1983.
- [10] Comité Euro-International du Béton: *Vibration Problems in Structures*, Bull. d'Information nº 209, Lausanne, 1991.
- [11] Branco, F.; J.; Azevedo, J.; Proença, J.: *Medição de Vibrações no Hotel Metrópole*. Rel. CMEST EP 8/95, 1995.

