

NOVAS PERSPECTIVAS NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS

E. Caetano, A. Cunha, F. Magalhães

Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia (FEUP), Departamento de Engenharia Civil
Laboratório de Vibrações e Monitorização (ViBest, www.fe.up.pt/vibest)



RESUMO

Centrando-se no estudo do comportamento dinâmico de estruturas do âmbito da Engenharia Civil, o presente trabalho descreve alguns dos desenvolvimentos mais relevantes no contexto da instrumentação, ensaio e monitorização, discutindo as correspondentes repercussões em termos das técnicas utilizadas e do conhecimento do comportamento dinâmico estrutural.

1- INTRODUÇÃO

A análise experimental de tensões estabeleceu-se como área de investigação na década de 40 do século passado, após a introdução dos extensómetros eléctricos (Sabnis et al. 1983). Os primeiros ensaios realizados tinham por base modelos físicos de estruturas complexas construídos à escala, para as quais não era possível utilizar modelos analíticos descritivos do comportamento. Nesse contexto, surgiram na Europa diferentes laboratórios de investigação. Em Portugal, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, estabeleceu-se como um reputado centro de ensaios, desenvolvendo instrumentação, técnicas de construção de modelos físicos e métodos de observação.

A conjugação dos resultados de observação em modelo físico com resultados da modelação numérica introduzida nas décadas de 60 e 70 possibilitou o avanço do conhecimento do comportamento estrutural e permitiu a optimização da utilização dos materiais, que se traduziu em construções

progressivamente mais esbeltas e também mais complexas.

Em contrapartida, o imenso avanço introduzido com os computadores e técnicas computacionais originou o progressivo abandono dos ensaios em modelo físico, dado o seu elevado custo e morosidade. Actualmente, estes ensaios são realizados apenas em áreas em que claramente existem dificuldades na caracterização numérica das acções e/ ou do comportamento estrutural, como é o caso da Engenharia do Vento, ou no caso de estruturas de grande complexidade (grandes pontes, barragens, edifícios especiais). A complexidade das estruturas construídas implica a caracterização, não apenas do comportamento dos materiais, mas também das condições fronteira, do estado de tensão e deformação, e ainda do comportamento dinâmico dos protótipos. Nesse sentido, e em paralelo com o desenvolvimento de ensaios em modelo físico e com a realização de análises numéricas progressivamente mais sofisticadas, tem havido lugar a um desenvolvimento da instrumentação para a observação de

protótipos, assim como das técnicas de aquisição e processamento de dados.

Centrando-se no estudo do comportamento dinâmico de estruturas do âmbito da Engenharia Civil, o presente trabalho descreve algumas das inovações mais relevantes e discute as correspondentes repercussões em termos das técnicas de ensaio e do conhecimento do comportamento dinâmico das estruturas.

2 - ENSAIOS DINÂMICOS

Focando especificamente o estudo do comportamento dinâmico de protótipos, merecem referência estudos precursores realizados por Carder (1936), Vincent (1958), Keightley et al. (1961), Crawford et al. (1964), Marecos et al. (1969), McLamore et al. (1971) e Trifunac (1972). Estes estudos centram-se essencialmente na identificação de frequências naturais de pontes, barragens e edifícios e, em alguns casos, na identificação da configuração modal associada ao modo de vibração fundamental, utilizando como fonte de excitação a ambiental ou a produzida por equipamento mecânico apropriado. Em termos de instrumentação, referem-se nesses estudos a utilização de sismógrafos, acelerómetros mecânicos ou extensómetros eléctricos. Atendendo a que estes sensores tinham uma precisão e fiabilidade limitadas, os ensaios dinâmicos eram utilizados essencialmente como complemento dos estudos analíticos ou numéricos. Contudo, é interessante referir que nestes primeiros ensaios foram estabelecidas técnicas de ensaio que são utilizadas actualmente. Assim, os ensaios de vibração forçada realizados com excitadores mecânicos na barragem de Encino em 1961 são semelhantes em natureza aos ensaios realizados na ponte de Tataru em 1999 (Yamaguchi et al. 1999), ainda que os últimos se baseiem na utilização de um excitador hidráulico de grande potência. Da mesma forma, os ensaios de determinação da resposta dinâmica à passagem de camiões sobre pranchas de madeira realizados por Marecos (1964) sobre uma ponte em arco são semelhantes aos realizados sobre a ponte Vasco da Gama em 1998 (Caetano 2000), com o propósito de caracterizar factores de

amplificação dinâmicos. No primeiro caso, foram utilizados extensómetros eléctricos e um registador em papel, enquanto que no último se utilizaram sismógrafos, dotados de um sistema de conversão digital e armazenamento do sinal em disco. Faz-se também referência ao ensaio de vibração livre realizado sobre a ponte 25 de Abril em 1969 (Marecos et al. 1969), em que se aplicou uma força impulsiva por rotura de uma barra calibrada e se registou a resposta em vibração livre. Com a diferença do equipamento e sistema de aquisição utilizados, este ensaio foi identicamente realizado em 1995 na ponte da Normandia (Bietry e Jan 1995) e em 1998 na ponte Vasco da Gama (Caetano 2000), neste último caso com o propósito de identificar com precisão o coeficiente de amortecimento associado ao primeiro modo de torção. Finalmente, a técnica utilizada no ensaio de vibração ambiental da ponte de Newport (McLamore et al. 1971) é também semelhante à utilizada presentemente nos ensaios de grandes pontes, como a ponte Vasco da Gama (Cunha et al. 2001).

Os notáveis ensaios acima referidos, realizados nas décadas de 60 a 80, abriram claramente o caminho ao melhor conhecimento estrutural e ao desenvolvimento dos próprios sensores e sistemas de medição. A evolução e incremento das capacidades computacionais e a utilização da internet para transmissão de dados, possibilitaram contudo um desenvolvimento extraordinário das técnicas experimentais, que se afirmam hoje como um vector fundamental no apoio ao projecto e verificação de estruturas mais complexas e começam a ser integradas nos sistemas de gestão de construção, com o objectivo de apoiar a decisão de implementação de modificações/ reparações em face da detecção de danos. Descrevem-se nas secções seguintes alguns dos desenvolvimentos mais relevantes registados ao nível de sensores e sistemas de aquisição, exemplificando-se com algumas aplicações realizadas no âmbito das actividades de investigação e consultoria do Laboratório de Vibrações e Monitorização de Estruturas da FEUP (ViBest, www.fe.up.pt/vibest).

3 - TÉCNICAS DE ENSAIO

3.1 - Ensaios de vibração forçada

A opção por um ensaio de vibração ambiental, livre ou forçada deve ser feita em função dos resultados pretendidos e das da estrutura em estudo, tendo presentes as características dos equipamentos de excitação e medição disponíveis, assim como os custos envolvidos.

No passado, as grandes estruturas (pontes, barragens) eram habitualmente ensaiadas com recurso a ensaios de vibração forçada, utilizando excitadores mecânicos ou hidráulicos aplicando forças com variação sinusoidal ou aleatória numa banda de frequências de interesse. Construíam-se então funções de resposta em frequência (FRFs) relacionando a resposta, medida em termos de aceleração, com a excitação, medida ou calculada, aplicada em um ou mais pontos ao longo da estrutura. A aplicação de algoritmos de identificação a estas FRFs permitia a identificação de parâmetros modais, nomeadamente frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento. Esta técnica, transposta directamente da análise modal dita convencional, aplicada usualmente a estruturas no âmbito da Engenharia Mecânica, melhorada progressivamente com a introdução de sensores de alta sensibilidade e algoritmos de identificação mais poderosos (Portugal et al. 1992, Cantieni et. al. 1994, Pietrzko et. al 1996), constitui ainda hoje a via mais rigorosa para a caracterização de sistemas estruturais. No entanto, os elevados custos associados à utilização de um excitador com potência suficiente para induzir uma resposta estrutural de amplitude superior à ambiental, fazem com que apenas em situações muito particulares sejam aplicados hoje em dia. Este aspecto assumiu maior relevância nos últimos anos, com o baixo nível de ruído alcançado pelos sensores e com o desenvolvimento de técnicas de identificação ditas “output-only”, descritas na secção 3.3. Há contudo situações em que se torna imprescindível a utilização de uma fonte de excitação. Refere-se como exemplo a recente caracterização do comportamento dinâmico da ponte pedonal

Pedro e Inês, em Coimbra após introdução de um conjunto de amortecedores de massas sintonizadas (TMDs) para controlo das vibrações induzidas por peões (Caetano et al. 2009). Nessa situação, tendo-se observado uma menor eficiência dos TMDs do que a esperada, pretendeu-se caracterizar o real comportamento da ponte pedonal em situação de activação dos TMDs, o que implicava a aplicação controlada de uma excitação capaz de induzir níveis de vibração superiores aos registados em condições de utilização por um número reduzido de peões.

A utilização de um excitador hidráulico construído no Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP, capaz de aplicar uma força sinusoidal de cerca de 1500N a uma frequência natural de 0.8Hz, através da oscilação de uma massa de 1200kg (Fig. 1), permitiu a construção de FRFs antes e após activação do TMD horizontal (Fig. 2), a partir das quais se extraíram os coeficientes de amortecimento nas duas situações (sem activação dos TMDs: $f=0.83\text{Hz}$; $\xi=0.55\%$; após activação dos TMDs: $f_1=0.79\text{Hz}$; $\xi_1=6.5\%$; $f_2=0.88\text{Hz}$; $\xi_2=4.0\%$).



Fig. 1 – Excitador hidráulico na ponte Pedro e Inês

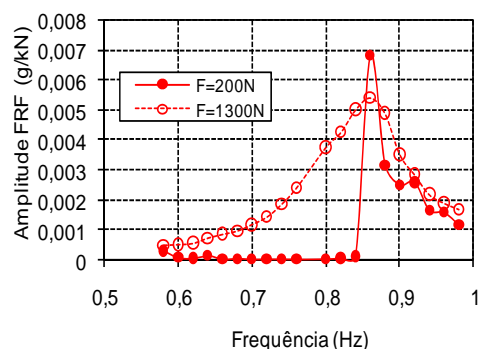


Fig. 2 – FRFs sem e com activação de TMD

3.2 - Ensaios de vibração livre

Os ensaios de vibração livre são utilizados, em geral, para a determinação de coeficientes de amortecimento modais. No passado, a aplicação de uma acção impulsiva, conseguida por libertação súbita de uma massa suspensa, ou por corte de uma barra traccionada, tinha adicionalmente por objectivo induzir uma resposta mensurável na estrutura, de modo a caracterizar também com precisão a frequência fundamental (Marecos et al. 1969). Na generalidade das estruturas, excepto eventualmente em barragens, os ensaios de vibração ambiental permitem hoje em dia a identificação precisa das frequências naturais. Já a identificação de coeficientes de amortecimento modais é efectuada com mais rigor em condições de vibração livre ou forçada, já que estes parâmetros exibem uma grande variabilidade para pequenas amplitudes de vibração e é também maior a incerteza associada à aplicação de algoritmos de identificação baseados na excitação natural. No caso específico da ponte Vasco da Gama, era fundamental conhecer o coeficiente de amortecimento associado ao primeiro modo de torção, com uma frequência de 0.47Hz, muito próxima da frequência natural do 2º modo de flexão (0.46Hz). Nesse sentido, mediu-se a resposta dinâmica após corte súbito de uma barra de suspensão de uma barçaça com a massa de 60 ton, aplicando uma força impulsiva numa secção próxima de 1/3 vão, excentricamente (Fig. 3) (Cunha et al. 2001). Nessas circunstâncias observou-se uma oscilação com amplitude máxima de cerca de 25 mm no ponto de suspensão da carga que, dado o baixo nível de amortecimento, perdurou por cerca de 8 minutos (Fig. 4).

Um ensaio do mesmo tipo foi realizado no viaduto de Millau, em França, mediante o corte súbito de uma barra traccionada com uma força de cerca de 1000 kN, tendo resultado uma amplitude máxima de oscilação de 42.5 mm. Tal como no caso da ponte Vasco da Gama, a medição da resposta em diferentes secções e a filtragem de sinais permitiram a identificação simultânea de vários coeficientes de amortecimento, com valores variáveis entre 0.3% e 0.9% (Caetano et al. 2006).



Fig. 3 – Ensaio de vibração livre na ponte Vasco da Gama

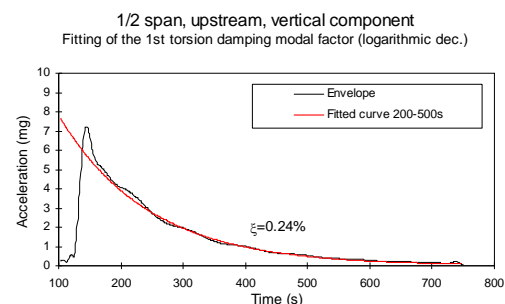


Fig. 4 – Identificação de coeficiente de amortecimento de modo de torção na ponte Vasco da Gama

3.3 - Ensaios de vibração ambiental

Estes ensaios, baseados na medição da resposta estrutural em condições de serviço, conheceram um enorme desenvolvimento na última década, em resultado da evolução das características técnicas dos sensores, digitalizadores e dos próprios algoritmos aplicados à identificação de frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento.

Assumindo que a estrutura está submetida a uma excitação que pode ser idealizada como um ruído branco na banda de frequências de interesse, a metodologia de ensaio consiste em escolher um ou mais sensores que se mantêm fixos em uma ou mais secções de medida, enquanto se registam, simultaneamente, as vibrações num outro conjunto de pontos com os restantes sensores disponíveis. Estes

últimos são eventualmente deslocados para um conjunto de novas posições para efectuar outro conjunto de registos, de novo em simultâneo com os sensores tomados como referência. O número de pontos de medida é determinado pela resolução espacial necessária para caracterizar um determinado conjunto de modos de vibração, antecipadamente estimados através de uma modelação numérica preliminar. Fixando a frequência de amostragem, determinada pelas características da estrutura a ensaiar e dos próprios sensores e sistema de aquisição de dados, torna-se necessário fixar o tempo de registo em cada secção de medida. Este é determinado em função da resolução em frequência pretendida para a identificação, variando tipicamente entre 10 minutos, no caso de estruturas com frequências relativamente elevadas e afastadas, e 1 hora, no caso de estruturas com frequências naturais muito baixas.

A extensão dos ensaios de vibração ambiental depende em grande parte do equipamento de medida utilizado e da disponibilidade em tempo para a realização do ensaio. No caso de grandes estruturas, coloca-se o problema da necessidade de grandes extensões de cablagens eléctricas, no sentido de obter uma representação adequada dos modos de vibração. Referem-se a título de exemplo os ensaios de vibração ambientais realizados em 1985 sobre a ponte suspensa de Humber, no Reino Unido, com um vão central de 1410m (Fig. 5), em que se utilizaram apenas 3 acelerómetros, 2 km de cabos e um sistema de gravação analógica em fita magnética (Brownjohn et al. 1987). Utilizando um acelerómetro como referência, percorreram-se sucessivamente 40 secções de medida ao longo do tabuleiro e torres, dispendo-se em cada secção os dois acelerómetros nas nas direcções vertical e lateral. Colhendo séries temporais de 1 hora, o ensaio teve a duração de 10 dias, sendo que a identificação de 100 frequências naturais e modos de vibração no intervalo de 0- 2Hz foi realizada num período de 6 meses.

Mais recentemente, e no âmbito de uma inspecção da ponte, foi realizado um novo



Fig. 5 – Ponte de Humber, Reino Unido

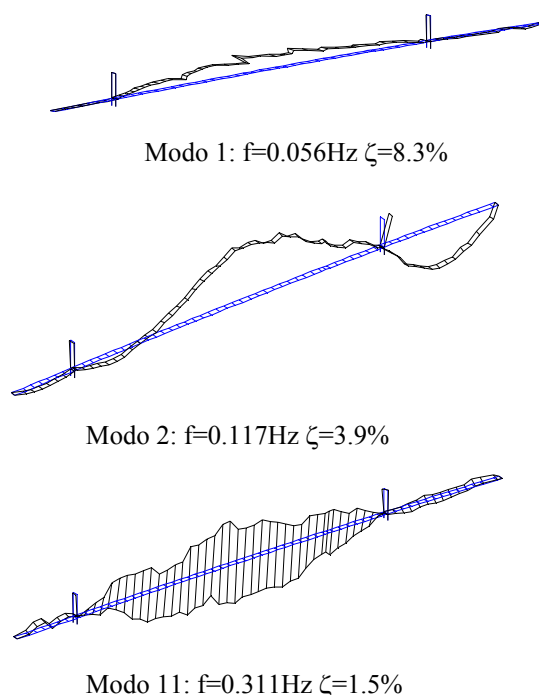


Fig. 6 – Modos de vibração identificados na ponte de Humber através de ensaio de vibração ambiental

ensaio sobre esta estrutura, que envolveu a participação conjunta da FEUP e da Universidade de Sheffield (Brownjohn et al. 2009). Tirando proveito de um conjunto de 10 sismógrafos triaxiais, programáveis através de um computador pessoal e sincronizados através de antenas GPS, foi possível instrumentar 76 secções ao longo do tabuleiro e torres num período de 5 dias, colhendo em cada secção acelerações nas extremidades opostas do tabuleiro segundo as três direcções, em períodos de 1h. Foram portanto colhidos dados relativos a 228 graus de liberdade da estrutura, utilizando dois pares de sensores como referências, o que melhor permitiu a separação dos modos de flexão e torção.

Tratando-se de uma estrutura de grande dimensão, caracterizada por um grande número de frequências naturais muito próximas, a mais baixa das quais de cerca de 0.06Hz, foram neste ensaio postos à prova os sensores e técnica de ensaio. Esta última revelou-se extremamente eficiente, dadas as grandes distâncias entre pontos de medida.

A utilização de sismógrafos em ensaios de vibração ambiental foi inicialmente introduzida por Rodrigues et al. (1997) nos ensaios de caracterização dinâmica das pontes da Figueira da Foz e da Arrábida. Estes dispositivos, formados por um sensor, um conversor analógico/digital e uma unidade de memória, e dotados de uma bateria com autonomia de cerca de 10 horas, eram inicialmente programados e sincronizados com o relógio interno do computador, constituindo verdadeiramente sistemas de medição “wireless” e dotados de grande interesse no ensaio de grandes estruturas, por dispensarem a utilização de cablagens eléctricas. As unidades mais recentes, dotadas de conversores de 24-bit utilizam antenas GPS para sincronização e podem ser combinadas com sensores de muito baixo ruído, preferencialmente inferior a 2 micro-g pico-a-pico, de grande sensibilidade, se possível superior a 1V/g, e baixa gama dinâmica de medida (+/- 0.5g), pelo que podem ser utilizadas em situações de muito baixas amplitudes de vibração na generalidade das estruturas de Engenharia Civil, inclusive barragens. Refere-se neste contexto terem sido observadas pelo LNEC amplitudes de vibração máximas de 20 micro-g em condições ambientais, com as turbinas desligadas, na barragem de Cabril. Estas amplitudes de vibração situam-se claramente no limite de sensibilidade dos actuais acelerómetros, mas apontam ainda para a possibilidade de nesta estrutura se efectuar a identificação de modos fundamentais recorrendo a ensaios de vibração ambiental.

Estando então provada a disponibilidade de sensores e eficiência das técnicas de medição de vibrações ambientais utilizadas presentemente, resta a discussão dos algoritmos de identificação de parâmetros modais. No passado, e já que eram limitados os dados colhidos através de

ensaio de vibração ambiental, era habitual o recurso a métodos de identificação simples, como o chamado método “Peak Peaking” (PP), baseado na identificação das frequências naturais através da selecção de picos nos espectros de frequências normalizados médios, e na identificação das componentes modais através da análise da amplitude / fase das FRFs construídas relacionando a resposta em cada ponto com a resposta num ponto de referência. Em todos os casos, este método fornecia estimativas dos modos operacionais de vibração e não dos modos de vibração, atendendo aos princípios em que se baseava. Presentemente, existem métodos mais rigorosos, que permitem em particular a separação de modos com frequências muito próximas e, teoricamente, de modos acoplados. Sem entrar em grandes detalhes, estes métodos são habitualmente divididos em dois grupos, os métodos não paramétricos, que se apresentam no domínio da frequência, e os métodos paramétricos, que podem ser apresentados no domínio do tempo ou da frequência. O método “Frequency Domain Decomposition” (FDD) constitui uma evolução do método PP, realizando uma decomposição em valores singulares da matriz dos espectros médios da resposta, de que resultam densidades espectrais de potência média de sistemas de 1 grau de liberdade cujos parâmetros são identificados. O método “Enhanced Frequency Domain Decomposition” (EFDD) obtém funções de autocorrelação a partir destes espectros, de cujo decaimento extrai o coeficiente de amortecimento modal correspondente.

De formulação mais complexa, os métodos paramétricos no domínio do tempo envolvem a escolha de modelos matemáticos idealizando o comportamento dinâmico estrutural, cujos parâmetros são em seguida identificados através de um processo de ajuste aos dados experimentais, seguindo critérios apropriados. Tais métodos podem ser aplicados directamente às séries temporais colhidas, ou alternativamente a funções de correlação, avaliadas com recurso ao algoritmo FFT, ou aplicando o método “Random Decrement” (RD).

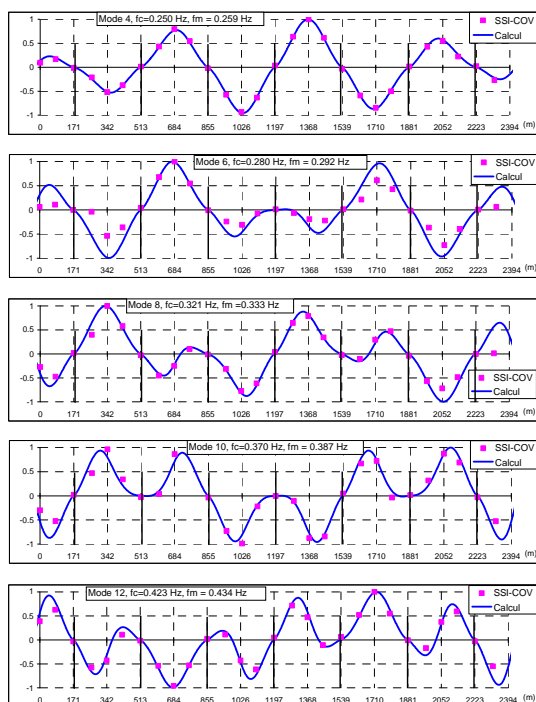


Fig. 7 – Modos de vibração verticais no viaduto de Millau. Correlação com configurações numéricas

Alguns dos métodos disponíveis foram implementados em Matlab e LabVIEW no seio do Laboratório ViBest (Magalhães 2004, Hu et. al. 2009) e também em aplicações comerciais, como o ARTEMIS (2000) e o PolyMAX (2004). Aplicações diversas em estruturas de grande complexidade têm sido realizadas com grande sucesso, em estruturas como a ponte Vasco da Gama, a ponte internacional sobre o rio Guadiana, a ponte atirantada sobre o rio Arade, a cobertura suspensa do Estádio Municipal de Braga, o Viaduto de Millau, em França, a ponte de Humber acima referida, ou a ponte do Infante. Algumas destas aplicações encontram-se descritas por Cunha et al. (2007). As excelentes correlações alcançadas entre os modos de vibração identificados com base em ensaios de vibração ambiental e as configurações modais obtidas numericamente são evidentes no caso particular do viaduto de Millau, a que se refere a Fig. 7.

4 - MONITORIZAÇÃO DINÂMICA

No passado, a monitorização das grandes estruturas era conduzida com o propósito essencial de acompanhar o comportamento estrutural, em geral medindo deformações e

inclinações, assim como outras grandezas relacionadas com a degradação dos materiais. A introdução de sistemas de aquisição baseados em placas de aquisição de dados permitiu a incorporação gradual de sensores para a observação do comportamento dinâmico. Numa fase inicial, foram instalados sistemas de observação mínimos, constituídos por dois ou três acelerómetros triaxiais, colocados por exemplo na secção de meio vão e no topo de uma ou das duas torres, no caso de uma ponte atirantada ou suspensa, e dotados de um sistema de disparo, para registo da resposta dinâmica em condições particulares de funcionamento, como sismos e tempestades.

A redução dos custos dos computadores e sensores permitiu um aumento progressivo da dimensão dos sistemas de monitorização, passando em alguns países a ser prática habitual a instalação de sistemas de monitorização do comportamento dinâmico dotados de várias dezenas de canais. Dada a quantidade de dados colhida, e a impossibilidade de em permanência processar e gerir os sinais colhidos, rapidamente se verificou a total ineficiência de muitos dos sistemas de medição dinâmicos. Mais recentemente, tem havido lugar a uma melhor definição das necessidades em termos de caracterização contínua do comportamento dinâmico. Ao mesmo tempo, o investimento em algoritmos para processamento on-line de dados tem contribuído para um real aproveitamento das capacidades de um sistema de observação em contínuo do comportamento dinâmico de estruturas, e para um conhecimento até agora impossível da influência de certos factores climáticos e externos. Uma experiência importante nesse contexto é a da monitorização dinâmica da ponte Infante D. Henrique, no Porto, realizada pelo ViBest, através de uma rede de 12 acelerómetros (Magalhães et al. 2008) que nos últimos 3 anos tem funcionado em permanência, gerando registos consecutivos de 30 minutos de duração que são enviados através de uma ligação ADSL para um computador locali-

zado na FEUP. Estes registos são imediatamente processados, fornecendo não apenas medidas estatísticas da resposta dinâmica (Fig. 8), mas também os próprios parâmetros modais, que são estimados para cada registo de 30 minutos.

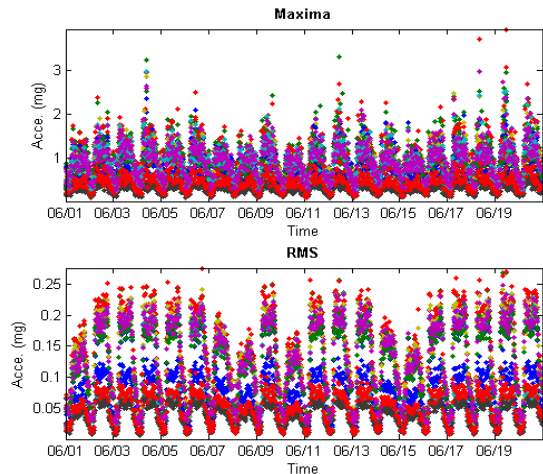


Fig. 8 – Monitorização da ponte Infante D. Henrique: valores máximo e rms das acelerações registadas por 12 acelerómetros de 1/6/2007 a 20/6/2007

O mapa de cores apresentado na Fig. 9 evidencia 11 “riscas” representativas das frequências naturais verticais no intervalo 0-5 Hz, registadas no período de 17/10/2007 a 31/11/2007. Uma análise mais detalhada de cada “risca” mostra a flutuação anual das frequências naturais, como exemplificado na Fig. 10 para o 2º modo de vibração. Conclui-se portanto que a observação contínua do comportamento dinâmico permite detectar flutuações de 0.01Hz associadas ao ciclo de variação térmica da estrutura. Como tal, esta informação pode ser utilizada na avaliação dos efeitos térmicos ou então, após a sua remoção,

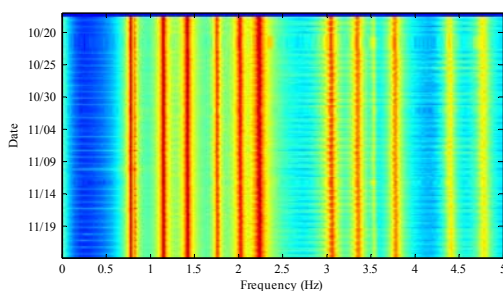


Fig. 9 – Monitorização da ponte Infante D. Henrique: mapa de cores relativo à identificação de frequências naturais de 17/10/2007 a 30/11/2007

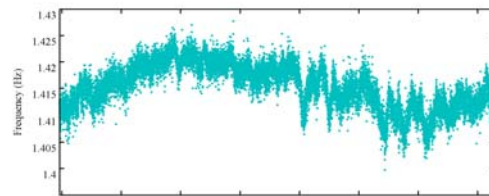


Fig. 10 – Monitorização da ponte Infante D. Henrique: variação anual da frequência associada ao 2º modo de vibração

pode ser utilizada na avaliação de dano na estrutura, referindo os parâmetros dinâmicos a uma situação inicial tomada como a situação de dano nulo da estrutura.

5 - NOVOS SENSORES E SISTEMAS DE AQUISIÇÃO

A par da consolidação e melhoramentos técnicos nos sensores mais convencionais e nos sistemas de aquisição de dados, outros sistemas de instrumentação têm sido desenvolvidos com interesse no campo específico da observação de estruturas de Engenharia Civil. Algumas soluções já implementadas são descritas em termos de sensores e de sistemas de aquisição e transmissão de dados.

5.1 - Sensores

Os sistemas de monitorização actuais, baseados em redes de acelerómetros e extensómetros, permitem a obtenção de dados com elevada qualidade. São no entanto de difícil e custosa instalação em estruturas já existentes e possuem limitações, nomeadamente quando são necessários numerosos pontos de observação e o seu acesso é difícil. Importa portanto encontrar sistemas de medição alternativos, como por exemplo os baseados em métodos ópticos. A utilização de tais sistemas em Engenharia Civil tem sido muito limitada, centrando-se essencialmente na medição de deslocamentos absolutos, já que tal não é permitido pelos acelerómetros. Estes deslocamentos são medidos com recurso a câmaras de vídeo digitais que registam o movimento de um alvo. Utilizando algoritmos de seguimento de objectos, quantifica-se o movimento desses alvos. Este tipo de sistemas foi utilizado, por exemplo, na determinação

de flechas na ponte de Humber, acima referida (Stephen et al. 1993).

Um outro conjunto de aplicações centra-se na aplicação de técnicas de interferometria laser. Nestes sistemas, um feixe laser é transmitido e reflectido, após contacto com uma superfície em oscilação. A comparação dos feixes incidente e reflectido permite a quantificação da velocidade de vibração. O vibrómetro laser baseado no efeito Doppler opera em elevadas frequências, o que permite a concepção de um sistema de instrumentação distribuído, baseado na utilização de um único sensor e de um sistema de varrimento espacial que permite a realização de leituras segundo os pontos de uma grelha definida inicialmente. A combinação de tal sensor com um sistema de excitação forçada permite que, induzindo ressonância numa estrutura, se possam medir directamente as componentes do modo de vibração. Um sistema desta natureza foi utilizado na identificação de forças nos tirantes da ponte Vasco da Gama, através da medição indirecta de frequências naturais (Cunha et al. 1999), tendo-se obtido estimativas de frequência natural com qualidade semelhante à de um acelerómetro para distâncias ao ponto de medição de cerca de 3m. No entanto, o sistema utilizado está preparado para realizar medições a distâncias da ordem de 100 m, o que o torna particularmente interessante na instrumentação de estruturas com limitações específicas em termos de contacto, como é o caso de antenas electrificadas.

Refere-se finalmente um inovador sistema visual para medição de vibrações baseado exclusivamente na utilização de uma câmara de vídeo com uma frequência de amostragem de 30 Hz e um sistema de processamento de imagem. Este sistema foi projectado visando uma instalação fácil e rápida para obtenção de imagens à distância e consequente processamento das mesmas de forma a obter séries temporais que descrevam a vibração de vários pontos de interesse. Permite, portanto, a realização de medidas num conjunto infinito de pontos da estrutura. Em contrapartida, são utilizados algoritmos complexos e computacionalmente pesados, com a obtenção, de momento, de dados com uma menor

precisão em comparação com dados obtidos por acelerómetros ou extensómetros. Existem contudo situações em que uma menor precisão é aceitável em face das vantagens alcançadas, como é o caso da monitorização de tirantes em pontes atirantadas e de certas pontes pedonais. Relativamente às primeiras, se o objectivo for identificar as condições de ocorrência de vibrações dos tirantes, existe a exigência de instalação de um elevado número de sensores nestes elementos, o que constitui uma tarefa virtualmente impossível, dada a dificuldade, o custo e o risco de conduzir os sinais medidos a um sistema central de aquisição através de cablagens. Pelo contrário, usando apenas uma câmara, é possível adquirir imagens de toda a área de interesse e observar simultaneamente a vibração em vários pontos, ainda que a sua caracterização espacial seja incompleta. O processamento em tempo real de um conjunto de pontos considerados críticos permite ainda que o sistema de visão active o sistema geral de monitorização. A combinação destes sinais com os obtidos simultaneamente através de uma rede de acelerómetros e anemómetros instalados no tabuleiro da ponte, permite uma análise integrada da estrutura. A aplicação deste sistema à monitorização dinâmica dos tirantes da ponte internacional sobre o rio Guadiana foi realizada através de uma câmara de vídeo instalada num edifício do Instituto de Conservação da Natureza, a cerca de 850m da ponte (Fig. 11).



Fig. 11 – Aplicação de sistema de visão à monitorização dinâmica da ponte internacional sobre o rio Guadiana. Localização da câmara de vídeo

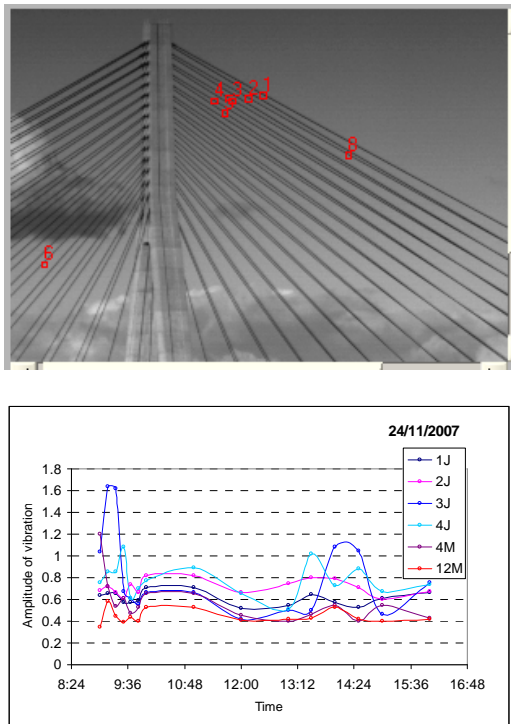


Fig. 12 – Aplicação de sistema de visão à monitorização dinâmica dos tirantes da ponte internacional sobre o rio Guadiana

Ligada a um computador portátil, a câmara efectuou medições contínuas durante vários meses, no período das 9h00-16h00. Nesses períodos, e utilizando o método do fluxo óptico, foram sendo construídas séries temporais de velocidades de um conjunto de pontos seleccionados (Fig. 12), as quais foram posteriormente integradas, rodadas e escaladas de modo a fornecerem a variação temporal dos deslocamentos. A Fig. 12 mostra a variação diária das amplitudes máximas observadas num conjunto de tirantes em registos de 20 minutos, o que permite detectar episódios de vibração dos tirantes, caracterizando a sua duração e, correlacionando com as velocidades e direcções de vento fornecidas por uma estação meteorológica local.

5.2 - Sistemas de aquisição de dados

No que respeita aos sistemas de aquisição de dados, faz-se referência à redução progressiva do seu custo, à existência de ambientes de programação, como o LabVIEW, que muito facilitam implementações com diferentes níveis de complexidade, e ainda à importância da internet na transmissão de dados, tanto de um

computador localizado na estrutura para um centro de processamento da informação, como também entre diferentes unidades ao longo da estrutura. Refere-se também que, no âmbito dos problemas de Engenharia Civil, a transmissão de dados em tempo real não é verdadeiramente uma necessidade e introduz um grau de complexidade adicional no sistema de medida, sendo em geral preferível efectuar a transmissão de dados após gravação das séries registadas, por períodos da ordem de 20 -30 min.

Por fim, e em oposição aos sistemas em “estrela” habituais, em que todos os sensores estão ligados ao computador central por cabos independentes, outras concepções têm sido experimentadas, com a finalidade de reduzir ou eliminar a utilização de cablagens eléctricas. No âmbito de uma colaboração com os colegas Armindo Lage e Augusto Gomes, está em curso na ponte pedonal da FEUP uma experiência piloto em que apenas um cabo eléctrico é utilizado para ligar todos os sensores entre si e ao computador central. Este cabo efectua a alimentação eléctrica dos sensores e transporta igualmente os sinais colhidos, a uma frequência de 100Hz, digitalizados junto do sensor.

Num último nível, refere-se a construção e utilização de sistemas “wireless”. Embora muitas implementações tenham sido ensaiadas, estes sistemas encontram-se ainda hoje numa fase experimental e possuem uma limitação fundamental, relacionada com a alimentação eléctrica. Daí que a melhor estratégia de utilização passe pelo “adormecimento” do sistema como situação habitual, à excepção de um número limitado de sensores (MEMs, em geral), que detectam eventos específicos e comunicam a um computador, no sentido de imediatamente todos os sensores serem activados, efectuarem um registo, que é imediatamente digitalizado através de uma unidade de processamento individual, e transmitido via rádio para o computador, regressando de seguida ao seu estado habitual. Este sistema foi recentemente implementado numa ponte de caminho de ferro, para detecção da resposta dinâmica durante o atravessamento de comboios (Bishop et al. 2009).

6 - O PROBLEMA INVERSO

Alguns dos desenvolvimentos apresentados na secção anterior, como os sistemas “wireless”, têm por objectivo resolver problemas específicos relacionados com a instrumentação e monitorização sem proporcionarem necessariamente sinais e resultados de maior qualidade que os sistemas de medição convencionais. Contudo, é um facto que a generalidade dos sensores e sistemas de medida permite na actualidade a identificação de parâmetros dinâmicos com um elevado nível de rigor. Tão elevado, que o conhecimento das propriedades dinâmicas pode ser utilizado na formulação do chamado problema inverso, ou seja, na caracterização das acções tendo por base o conhecimento da resposta dinâmica e o conhecimento das propriedades do sistema. Neste sentido, a monitorização passa a ser efectuada com o objectivo, não apenas de conhecer as propriedades e resposta dinâmica, mas também com o propósito de caracterizar, por exemplo, a acção do vento sobre o tabuleiro de uma ponte. Refere-se como exemplo o sistema de monitorização recentemente instalado na ponte da Grande Ravine, construída na ilha da Reunião. Estando esta estrutura inserida numa zona frequentemente fustigada por tufões, e com o objectivo de validar os estudos realizados em túnel de vento no que respeita à quantificação da acção do vento e de coeficientes de força sobre o tabuleiro, dotou-se este sistema de um conjunto de anemómetros sónicos (Fig. 13 (a)), de modo a caracterizar a estrutura do vento. Em simultâneo, foram instalados sensores de pressão em vários pontos de uma secção do tabuleiro (Fig. 13(b)), de modo a correlacionar as pressões medidas com as pressões obtidas em túnel de vento para valores do número de Reynolds substancialmente diferentes dos reais. Este projecto, desenvolvido pela empresa SETEC em colaboração com o ViBest, encontra-se numa fase inicial.

7- CONCLUSÕES

Apresenta-se neste trabalho uma reflexão sobre os instrumentos disponíveis na actualidade no contexto da observação

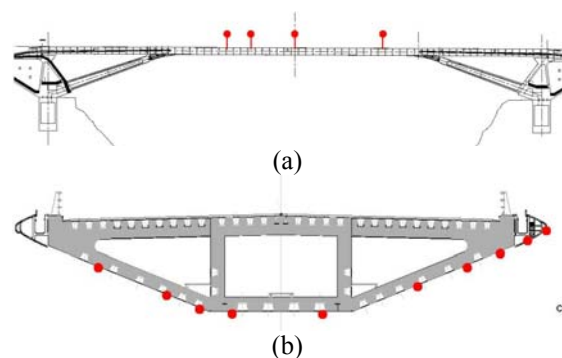


Fig. 13 – Monitorização do viaduto da Grande Ravine, ilha da Reunião: localização de (a) anemómetros e acelerómetros; (b) sensores de pressão

do comportamento dinâmico de estruturas de engenharia civil. A visão apresentada é necessariamente parcial e traduz a experiência dos autores, já que os imensos progressos realizados em anos recentes têm permitido outros desenvolvimentos, em termos de sensores e de sistemas de aquisição de dados. No essencial, interessa reter a grande diversidade de soluções disponíveis no mercado em termos de sensores e de sistemas de aquisição de dados, e importa o conhecimento do elevado grau de rigor e da grande quantidade de informação disponibilizada por estes sistemas relativa ao comportamento estrutural. Estes são novos dados para o Projectista e para os Donos de Obra que, numa perspectiva de médio e longo prazo, poderão largamente beneficiar da incorporação de sistemas de observação nas estruturas mais complexas.

8- REFERÊNCIAS

- ARTeMIS. 2000. Ambient Response Testing and Modal Identification Software, Structural Vibrations Solutions, Denmark.
- Bietry, J. & Jan, P. 1995. Essais Dynamiques du Pont de Normandie. *Report of “Mission du Pont de Normandie”*. EN-D 95.5 C.
- Bischoff R., Meyer J., Enochsson O., Feltrin G Elfgren L. 2009. Event-based strain monitoring on a railway bridge with a wireless sensor network. 4th Int. Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-4), Zurich, Switzerland.
- Brownjohn J., Dumanoglu A., Severn R., Taylor C. 1987. Ambient vibration measurements of the Humber suspension bridge and comparison with calculated characteristics. Proc. ICE Pt2 83, 561-600

- Brownjohn J., Magalhães F., Caetano E., Cunha A. 2010. Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge. Eng. Struct. (aceite para publicação).
- Caetano E. 2000. Dynamics of Cable-Stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction, PhD Thesis, University of Porto, Portugal.
- Caetano E., Cunha A. & Magalhães F. 2006. Ensaios dinâmicos do viaduto de Millau: Cont. VIBEST/FEUP, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa.
- Caetano E., Cunha A., Moutinho C. & Magalhães F. 2009. Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 2: Implementation of tuned mass dampers, Eng. Struct. doi:10.1016/j.eng_struct.2009.12.034.
- Caetano E., Silva S., Bateira, J. 2010. A vision system for vibration monitoring of civil engineering structures. Exp. Techn., SEM (aceite para publicação).
- Cantieni R., Deger Y. & Pietrzko S. 1994. Large structure investigation with dynamic methods: the bridge on the river Aare at Aarburg, Prestressed Concrete in Switzerland, Report of the Swiss FIP Group to the 12th FIP Congress, Washington D.C..
- Carder D. 1936. Observed vibrations of buildings, Bull. Seismological Society of America, Vol. 26, no. 4, pp 245-277.
- Crawford R. & Ward, H. 1964. Determination of the natural period of buildings, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 54, no. 6, pp. 1743-1756.
- Cunha A. & Caetano E. 1999. Dynamic Measurements on Stay Cables of Cable-Stayed Bridges using an Interferometry Laser System, Experimental Techniques, (SEM), Vol. 23, No. 3, pp.38-43.
- Cunha A, Caetano E. & Delgado R. 2001. Dynamic Tests on a Large Cable-Stayed Bridge. An Efficient Approach, J. Bridge Engineering, ASCE, Vol.6, No.1, p.54-62.
- Cunha A., Caetano E., Magalhães F. 2007. Output-only Dynamic Testing of Bridges and Special Structures, Structural Concrete, Journal of FIB, 8, No.2, 67-85.
- Hu W.-H., Cunha A., Caetano E., Magalhães F., Moutinho C. 2009. LabVIEW toolkits for output-only modal identification and long-term dynamic structural monitoring. J. Struct. Infrastruct. Eng., in press.
- Keightley W., Housner G., Hudson D. 1961. Vibration Tests of the Encino Dam InTake Tower. Report. California Institute of Technology.
- LMS PolyMAX. 2004. New Integrated Modal Parameter Estimator, LMS International, Belgium.
- Magalhães F. 2004. Identificação Modal Estocástica para Validação Experimental de Modelos Numéricos, Tese de Mestrado, FEUP, Porto.
- Magalhães F., Cunha A. & Caetano E. 2008. Dynamic monitoring of a long span arch bridge, Eng. Struct., Volume 30, Issue 11, November 2008, 3034-3044.
- Marecos J. 1954. *Observation and test of the bridge over the river Sousa*, LNEC Report, Proc. 145-II, Structural Division (in Portuguese).
- Marecos J., Castanheta M. & Teixeira Trigo J. 1969. Field Observation of Tagus River Suspension Bridge. *J. Struct. Div., Vol. 95, No. ST4: 555-583*. ASCE.
- McLamore V., Hart G., Stubbs, I. 1971. Ambient vibration of two suspension bridges, ASCE Journal of the Structural Division, Vol. 97, No. ST10, 2567-2582.
- Pietrzko S., Cantieni R. & Deger Y. 1996. Modal testing of a steel/concrete composite bridge with a servo-hydraulic shaker. Proc. 14th Int. Modal Analysis Conference, Dearborn, Michigan.
- Portugal A. e Caetano E. 1992. Experimental Evaluation of the Dynamic Characteristics of Portuguese Dams, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid.
- Rodrigues J., Campos Costa A., Sousa M. L. 1997. Caracterização dinâmica experimental da ponte da Arrábida na cidade do Porto, 3^o Encontro sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Portugal.
- Sabnis G., Harris H., White R., Mirza M. 1983. Structural Modeling and Experimental Techniques. Prentice-Hall, Inc.. ISBN 013853960X.
- Stephen G., Brownjohn J., Taylor C. 1993. Measurements of static and dynamic displacement from visual monitoring of the Humber Bridge, Eng. Struct, Vol.15, Iss.3, 197-208.
- Trifunac M. 1972. Comparisons between ambient and forced vibration experiments, Earth. Eng. Struct. Dyn., Vol. 1, 133-150.
- Vincent, G. 1958. Golden Gate Bridge Vibration Study, ASCE J. Struct. Div, Vol, 4, ST6.
- Yamaguchi K., Manabe Y., Sasaki N. & Morishita K. 1999. Field Observation and Vibration Test of the Tatara Bridge. *Cable-Stayed Bridges- Past, Present and Future. IABSE Conference, Malmö, Sweden*.