



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

Monitorização do Comportamento Estrutural de Pontes Estaiadas

Luís Oliveira Santos, PhD

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, luis.osantos@lnec.pt

Teresa Oliveira Santos, PhD

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, tosantos@lnec.pt

Min Xu, PhD

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, xumin@lnec.pt

João Pedro Santos, MSc

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, josantos@lnec.pt

Paulo Silveira, PhD

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, paulo.silveira@lnec.pt

Resumo

As pontes estaiadas, ou atirantadas, são obras de arte de grande qualidade estética que têm beneficiado de grande desenvolvimento, tanto ao nível dos materiais como dos métodos de cálculo e dos processos contrutivos, tornando-se soluções competitivas para um conjunto crescente de situações.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil tem observado o comportamento de cinco destas obras: a Ponte Internacional do Guadiana, a Ponte sobre o rio Arade, a Ponte Salgueiro Maia e a Ponte Rainha Santa Isabel, em Portugal, e a Ponte 4 de Abril, em Angola. A monitorização destas estruturas iniciou-se durante a construção, incluiu a realização de provas de carga estáticas e dinâmicas no final da construção e compreende o acompanhamento das obras em serviço até à atualidade.

Pretende-se nesta comunicação partilhar a experiência adquirida no âmbito da monitorização de pontes estaiadas, referindo os aspetos comuns, apontando algumas especificidades e sistematizando a evolução verificada na elaboração e implementação dos respetivos planos de monitorização. Finalmente, pretende-se perspetivar os aspetos mais promissores da evolução da monitorização deste tipo de estruturas.

Palavras-chave

Ponte estaiada; monitorização da integridade estrutural; provas de carga.



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

1. Introdução

As pontes estaiadas, ou atirantadas, são obras de arte de grande qualidade estética que, beneficiando do grande desenvolvimento, tanto ao nível dos materiais como dos métodos de cálculo e dos processos contrutivos, se têm tornado soluções competitivas para um conjunto crescente de situações.

As pontes estaiadas são sistemas estruturais complexos, em que a carga do tabuleiro é total ou parcialmente transmitida às torres pelos tirantes. A concepções iniciais com um número reduzido de tirantes, seguiram-se concepções com um número elevado de tirantes que permitem a utilização de tabuleiros de grande esbelteza, uma vez que o seu funcionamento estrutural se assemelha a uma viga contínua, com vãos correspondentes à distância entre tirantes. A forte compressão introduzida no tabuleiro e nas torres torna o betão um material competitivo para este tipo de estruturas.

A observação do comportamento de estruturas, realizada durante as diferentes fases de construção e em serviço, permite a verificação das teorias de comportamento estrutural consideradas na sua modelação e análise, a avaliação do seu desempenho com base em valores directamente medidos *in situ* e, conseqüentemente, a detecção precoce de eventuais deficiências, com evidentes benefícios em termos de segurança, manutenção, durabilidade e economia.

O acentuado esforço de modernização das infraestruturas de transportes que teve lugar em Portugal a partir de meados da década de 80 do século passado, incluiu a construção das suas primeiras pontes estaiadas de grande dimensão com suspensão contínua: a Ponte Internacional do Guadiana e a Ponte sobre o rio Arade, ambas concluídas em 1991, com vãos centrais de 324 m e 256 m, respectivamente. Após estes sucessos, outras obras deste tipo foram construídas, merecendo referência a Ponte Vasco da Gama (1998), em Lisboa, a Ponte Salgueiro Maia (2000), em Santarém, e a Ponte Rainha Santa Isabel (2004), em Coimbra. Mais recentemente, a engenharia portuguesa tem participado no esforço de construção de infraestruturas de transportes em diversos países, nomeadamente em Angola. Enquadra-se, neste contexto, a construção da Ponte 4 de Abril, sobre o rio Catumbela, em Angola.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) teve oportunidade de observar o comportamento estrutural de cinco destas obras: as pontes do Guadiana, do Arade, Salgueiro Maia e Rainha Santa Isabel, em Portugal, e, em parceria com o Laboratório de Engenharia de Angola, a Ponte 4 de Abril. A monitorização destas obras iniciou-se durante a construção, incluiu a realização de provas de carga estáticas e dinâmicas no final da construção e compreende o seu acompanhamento em serviço até à atualidade.

Pretende-se nesta comunicação partilhar a experiência do LNEC no âmbito da monitorização de pontes estaiadas. Para este efeito, após uma breve descrição das obras de arte monitorizadas, referem-se os diversos componentes de um sistema de monitorização, perspetivando-se os aspetos mais promissores da evolução da monitorização deste tipo de estruturas. Um vez que nesta comunicação se pretende chamar a atenção para as questões específicas das pontes estaiadas, será dada maior atenção à identificação dos parâmetros a



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

monitorizar, que se dividem em três grupos, conforme se pretenda caracterizar as ações, os materiais ou o comportamento estrutural. Assim nas secções seguintes serão indicados, para cada um destes grupos, os parâmetros que são mais relevantes para este tipo de estrutura, referindo-se as metodologias utilizadas pelo LNEC, bem como algumas que, sendo promissoras, se pretende utilizar nas próximas obras a monitorizar.

2. Pontes estaiadas observadas pelo LNEC

A ponte internacional sobre o rio Guadiana, em Castro Marim, é constituída por duas torres, em forma de Y invertido com cerca de 99 m de altura, por dois pilares de transição e pelo tabuleiro, com um comprimento total de 666 m, que inclui três vãos suspensos através de 64 pares de tirantes (Figura 1). O tabuleiro, em betão armado pré-esforçado, possui uma secção transversal em caixão monocelular com 2,5 m de altura (Martins, 1993).



Figura 1 – Ponte Internacional do Guadiana

A ponte sobre o rio Arade, em Portimão, é uma obra contínua com os seus viadutos de acesso, possuindo um tabuleiro constituído por uma laje com duas nervuras longitudinais tubulares. Os três tramos sobre o rio são totalmente suspensos por 64 pares de tirantes que asseguram a transmissão das cargas a duas torres em forma de Y invertido com 62 m de altura (Rito, 1993).



Figura 2 – Ponte sobre o rio Arade



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

A ponte Salgueiro Maia sobre o rio Tejo, em Santarém, tem um comprimento de 570 m, e um vão central de 246 m, suportado por 72 tirantes dispostos num único plano, ancorados no eixo do tabuleiro (Figura 3). O tabuleiro é constituído por uma secção em caixão de betão armado pré-esforçado, com uma altura de 2,5 m (Martins e Silveira, 2000).

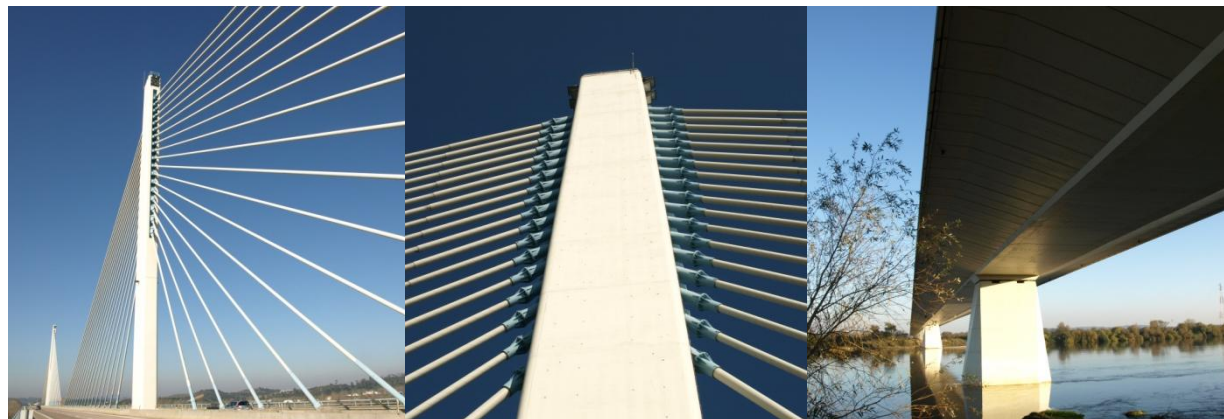


Figura 3 – Ponte Salgueiro Maia, sobre o rio Tejo, em Santarém

A ponte Rainha Santa Isabel, em Coimbra, possui com um único mastro, com uma inclinação de 8° relativamente à vertical e uma altura de 73 m acima do solo, no qual estão ancorados os 19 pares de tirantes que suspendem axialmente o tramo principal, sobre o rio Mondego. Estes tirantes são equilibrados por 9 pares de tirantes de retenção, dispostos em dois planos, que ligam diretamente a dois maciços de amarração (Figura 4). O tabuleiro tem uma altura de 3,70 m e é constituído por duas lajes de betão pré-esforçado, separadas por uma treliça metálica espacial de aço de alta resistência.



Figura 4 – Ponte Rainha Santa Isabel, em Coimbra

A Ponte 4 de Abril, sobre o rio Catumbela, na via rápida entre Benguela e Lobito, em Angola, é uma obra com suspensão total, contínua com os viadutos de acesso (Figura 5). A ponte, em betão armado pré-esforçado, é constituída por duas torres em forma de U, com cerca de 46 m de altura, e por três vãos suspensos através de 40 pares de tirantes dispostos em semi-harpa, ancorados no tabuleiro com um afastamento de 8,0 m entre si. O tabuleiro é formado por uma laje dotada de duas nervuras longitudinais, aligeiradas, dispondo de carlingas espaçadas de 4,0 m (Rito *et al*, 2008).



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012



Figura 5 – Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela, em Angola

Entre outros aspectos comuns às cinco obras, destaca-se a utilização de tirantes de cordões de aço de alta resistência, auto-protégidos com bainhas de polietileno extrudido de alta densidade. Este tipo de proteção, hoje muito comum, foi utilizada pela primeira vez nas ponte do Guadiana e do Arade.

Na Tabela 1 estão reunidas algumas características das cinco pontes, como o vão principal, o comprimento total e a largura do tabuleiro.

Tabela 1 – Principais características das pontes estaiadas observadas pelo LNEC

Ponte	Vão máx. (m)	Comprim. (m)	Largura (m)	Conclusão
Guadiana	324,0	666,0	18,0	1991
Arade	256,0	842,0	17,0	1991
Salgueiro Maia	246,0	570,0	28,2	2000
Rainha Santa Isabel	185,6	330,0	30,0	2004
4 de Abril	160,0	438,0	24,5	2009

3. A arquitetura do sistema de monitorização

A conceção de um sistema de monitorização estrutural depende naturalmente pelos objetivos definidos. Será necessário assumir um tipo de abordagem, estática ou dinâmica, e identificar as grandezas a monitorizar, por forma a caracterizar da melhor forma possível o comportamento estrutural e os efeitos provocados pelas ações e pelas variações exibidas pelos materiais. Torna-se assim necessário definir os diversos componentes que constituem um sistema de monitorização: rede de sensores e de unidades de aquisição, sistemas internos e externos de transmissão de dados, sistemas de armazenamento e backup de dados e uma cadeia de procedimentos e estratégias que permitam um adequado processamento e armazenamento dos dados.

A aquisição de dados consiste na recolha dos sinais gerados pelos sensores e da sua conversão em informação relativa aos parâmetros monitorizados. Numa obra de grandes dimensões, normalmente com um grande número de sensores e unidades de aquisição



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

instalados com grande dispersão espacial, fatores como o custo, a tipologia e a capacidade de frequência de aquisição são determinantes. Torna-se assim indispensável a definição da “rede de aquisição de dados” a instalar *in-situ* assim como de uma rede interna (ou local) de comunicação que assegure a sua interligação e a centralização dos dados num servidor local. Este, por sua vez, deverá estar acessível e em contacto com um servidor exterior à obra, quer este seja de acesso remoto, transferência de ficheiros ou base de dados.

Para além da definição física dos sistema de monitorização torna-se necessários capacitar estes sistemas com autonomia relativamente à transmissão, processamento, disponibilização de dados *on-line* e em tempo real e verificação de anomalias. Com o aumento de utilizadores deste tipo de sistemas, nomeadamente através da inclusão dos donos de obra nas actividades de monitorização, torna-se também necessário elaborar regras de permissão para acesso aos dados. O sistema desenvolvido no LNEC tem um carácter multi-agente e encontra-se espacialmente distribuído, como pode ser observado na Figura 6. Este sistema encontra-se já em funcionamento em diversas pontes monitorizadas pelo LNEC e é constituído por diversos componentes, humanos e de *software* que diariamente actuam em paralelo com o objectivo de gerir os dados estruturais e detectar atempadamente anomalias ou danos.

Este sistema, cujas instâncias físicas mais importantes se encontram representadas na Figura 6, encontra-se definido em diversas linguagens de programação, nomeadamente LabVIEW, SQL, R, Hayes Command Set e instruções aceites por cada marca e modelo de *data logger* utilizado. Ao passo que SQL e R são utilizadas maioritariamente na validação, tratamento e armazenamento dos dados, o Hayes Command Set permite ao sistema controlar as comunicações externas às obras de arte através de módulos de comunicação celulares de banda larga (3G). O LabVIEW constitui uma *framework* que envolve todas as outras linguagens permitindo não só controlar cada uma das instâncias e verificar o seu bom funcionamento assim como envolver as restantes linguagens, controlando o fluxo de informação e a calendarização das ações. Esta *framework* é também utilizada na comunicação com os servidores FTP e na criação de ficheiros executáveis e instaláveis que correm nos computadores instalados *in-situ* ou nos centros de controlo de utilizadores autorizados.

O sistema descrito na Figura 6 foi já alvo de publicações anteriores (J. P. Santos *et al*, 2009; J. P. Santos *et al*, 2010) e tem como principal objetivo a realização autónoma de cinco tarefas distintas.

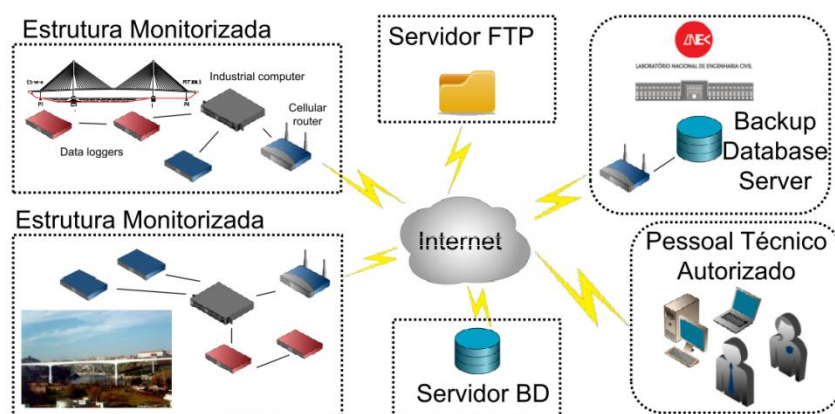


Figura 6 – Sistema multi-agente e espacialmente distribuído, desenvolvido no LNEC



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

A primeira consiste na aquisição de dados. Para realizar esta tarefa de forma autónoma e a partir de diversos *data loggers* com diferentes marcas e modelos foi desenvolvida uma *framework*, com recurso a *drivers* desenvolvidos no LNEC, permitindo assim uma aquisição de dados com funcionamento único e ligação directa a bases de dados disponíveis *on-line*. Em função das unidades de aquisição usadas estão disponíveis modos de monitorização estática, rápida (para aquisição de efeitos dinâmicos como tráfego e vento) e análise modal. Qualquer um destes tipos de aquisição pode ser iniciada e parada de acordo com calendarização ou com recurso a *triggers*.

A validação e pré-processamento de dados constituem a segunda tarefa que, para o caso de monitorização estática, visa remover efeitos externos, como por exemplo avaria de sensores ou da comunicação, e efeitos dinâmicos como os provocados pelo vento ou tráfego. No caso de monitorização dinâmica o sistema de monitorização instalado *in-situ* (Figura 7) realiza análise modal através de *Frequency Domain Decomposition* (Bricker *et al* 2001), evitando a transmissão de grandes quantidades de dados via 3G. A remoção de efeitos dinâmicos e externos é feita maioritariamente via métodos de estatística robusta uni e multivariada. Enquanto que a primeira é feita na instância instalada em obra (Figura 7) com recurso a sobreamostragem (J. P. Santos *et al*, 2010), a segunda é levada a cabo através de acesso remoto à base de dados utilizando amostras previamente recolhidas. Os critérios de paragem de remoção de *outliers* são feitos com recurso a testes estatísticos de *goodness-of-fit*, dos quais o implementado actualmente é o Kolmogorov-Smirnov por evidenciar melhor resultados nos testes já realizados.

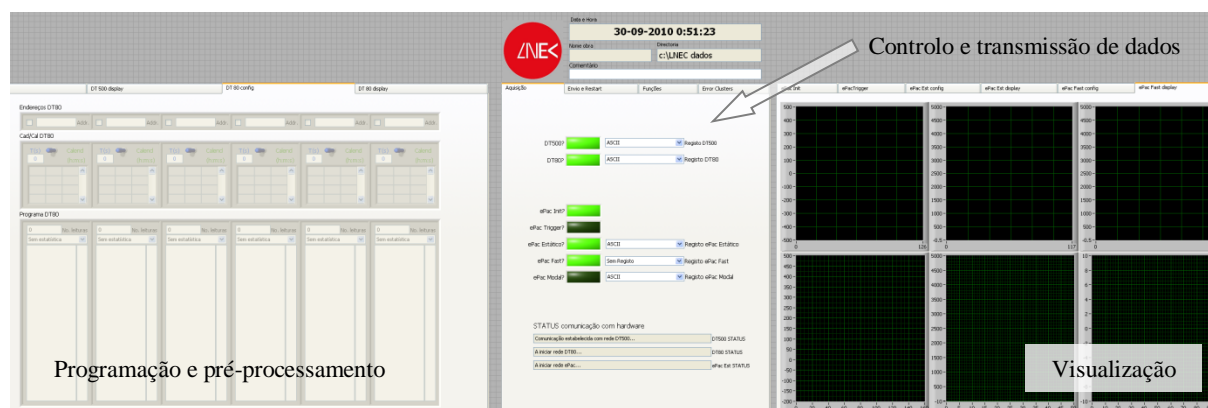


Figura 7 – Graphical user interface da instância instalada *in-situ*.

Após o pré-processamento dos dados procede-se à inserção e gestão dos mesmos através de um sistema de gestão de base de dados MySQL. Este tipos de bases de dados, relacionais, possuem diversas vantagens em relação aos convencionais sistemas de ficheiros. De entre as mais importantes contam-se a independência em relação a *software* e *hardware*, a possibilidade de acesso remoto, a pré-definição de utilizadores e regras de prioridade de acesso e a validação automática no que concerne integridade e consistência de dados. A utilização deste tipo de validação e regras requer a criação de um modelo de *metadata* (ou dados sobre dados) que foi desenvolvido no LNEC e estabelece todas as relações entre as diversas entidades intervenientes no processo de monitorização da integridade estrutural. Associado ao processo de armazenamento e validação de dados está a criação de um *log* de erros



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

que avisa o administrador da base de dados assim como os responsáveis pela monitorização de cada estrutura de qualquer anomalia ou ausência na chegada de dados. Deverá ser ainda referido o *software* de *backup*, desenvolvido em LabVIEW e SQL tendo em conta o volume de dados gerado pelas estruturas monitorizadas, que realiza *backups* incrementais via *web* para dois servidores MySQL situados em locais distintos do servidor principal.

A quarta tarefa realizada pelo sistema de monitorização consiste em separar os efeitos relativos a ações como a temperatura. No caso de monitorização estática tal pode ser feito diretamente nos sinais adquiridos ao passo que em monitorização dinâmica este passo aplica-se a parâmetros modais como as frequências ou as curvaturas dos modos de vibração obtidos ao longo do tempo. Para tal, rotinas de *machine learning* desenvolvidas em R acedem à base de dados MySQL e realizam tarefas de regressão recorrendo a dados relativos ao comportamento estrutural e às ações, adquiridos *in-situ*. De entre estes encontram-se já implementadas redes neuronais do tipo Perceptrão Multi-Camada com uma camada intermédia de neurónios artificiais e funções de ativação constituídas por tangentes hiperbólicas. No caso de não existirem medições representativas das ações atuantes na estrutura, foram também desenvolvidas ferramentas estatísticas em R, como é o caso das Componentes Principais, para determinar variáveis descorrelacionadas (“quase independentes”) que não se encontrem associadas ao efeito das ações. Quer estas quer as redes neuronais pretendem obter novos sinais (vulgarmente designados por resíduos) sem tendências ou variações importantes. No caso de medições estáticas estas variações ou tendências podem indiciar redistribuição de carga permanente, ao passo que variações em características modais podem ser geradas por alterações na rigidez estrutural. Qualquer uma destas indiciam, em geral, a presença de dano ou alterações estruturais importantes.

Por último o sistema recorre aos dados do passo anterior para realizar classificação estatística com vista à detecção automática das oscilações ou tendências referidas no parágrafo anterior. Esta tarefa permite a definição de critérios de alerta automáticos e realiza-se em geral através de controlo estatístico de processos ou análise de *clusters*. Estes dois métodos estatísticos definem-se como *unsupervised*, que ao contrário dos métodos *supervised*, não requerem, *a priori*, quaisquer dados relativos a situações a dano ou anómalas. A estratégia usada na definição do sistema de monitorização descrito insere-se assim na *novelty detection*, ou seja, no estudo de variações dos dados estruturais e sua comparação destes com uma referência na qual se sabe que a estrutura não possui anomalias.

4. Caracterização das ações

4.1. Considerações gerais

Em qualquer estrutura monitorizada é fundamental conseguir destriçar de modo tão completo quanto possível os efeitos decorrentes, não só das diversas ações actuantes, mas também do comportamento diferido dos materiais constituintes, de modo a poder detectar alterações, na evolução das grandezas que se encontram em observação, que possam significar anomalias ou danos estruturais. Nas pontes podem salientar-se os efeitos das ações ambientais, das sobrecargas devidas ao tráfego e dos sismos. O conhecimento destas ações assume, portanto, relevância significativa na compreensão da resposta estrutural.



4.2. Ações ambientais

Nas pontes de tirantes, as variações que se verificam na configuração da estrutura devido às ações térmicas ambientais são frequentemente superiores às deformações provocadas pela passagem do tráfego. Para além deste facto, a possibilidade da presença de diferentes materiais, como o aço e o betão, e também a existência de elementos estruturais com geometria e condições de exposição muito diversas, fazem com que estas estruturas sejam particularmente sensíveis às ações térmicas.

As defasagens que se verificam entre as evoluções da temperatura uniforme dos tirantes, temperatura uniforme do tabuleiro, temperatura diferencial das torres ou da temperatura diferencial do tabuleiro, fazem com que a compensação dos efeitos das ações térmicas, numa ponte de tirantes, seja imprescindível para uma correta interpretação da evolução das grandezas que se encontram a ser monitorizadas (Figura 8).

Face ao exposto é, pois, de toda a conveniência, a medição das temperaturas nos diversos elementos estruturais: tabuleiro, torres e tirantes. Existem diversos tipos de sensores que permitem a realização esta medição com diferentes níveis de custo e precisão: termómetros eléctricos de resistência (destacando-se os PT100), termopares, termistores, etc. No caso de torres e tabuleiros de betão torna-se importante a medição ao longo da espessura dos elementos (Figura 9); a caracterização do comportamento térmico dos tirantes apresenta também algumas especificidades (Santos *et al*, 1993).

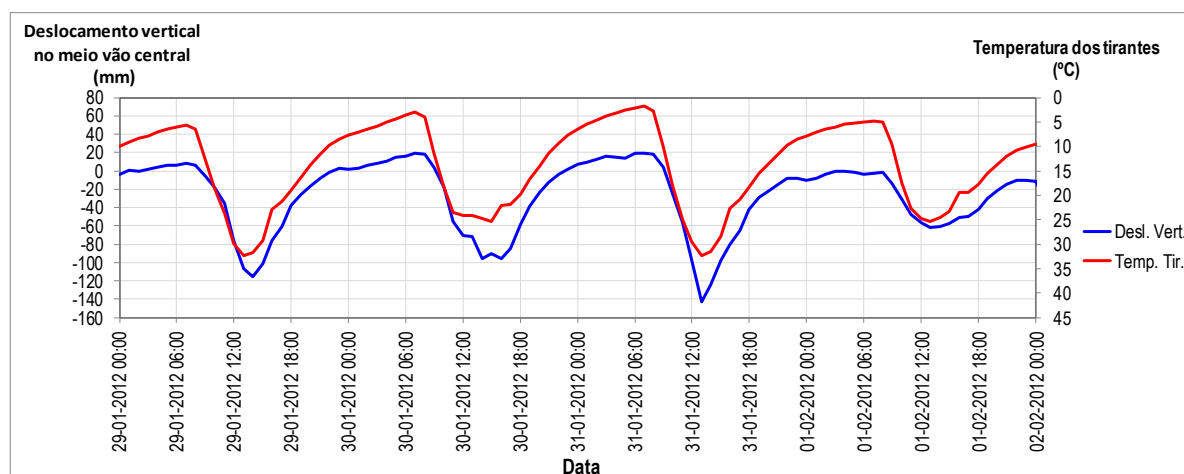


Figura 8 – Deslocamentos verticais e temperatura (Ponte Internacional do Guadiana)

A caracterização das condições meteorológicas envolventes da obra é uma prática cada vez mais comum no âmbito da monitorização estrutural, envolvendo a medição de temperatura e humidade relativa – procedimento corrente – e, em situações de maior exigência, a medição da pluviosidade, direção e velocidade do vento, recorrendo-se para tal a estações meteorológicas (Figura 9).



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012



Termómetros no interior do betão



Estação meteorológica

Figura 9 – Medição de acções ambientais

O vento é uma ação determinante na concepção das pontes estaiadas e suspensas, designadamente na configuração da secção transversal do tabuleiro. Este facto torna necessária, na generalidade dos casos, uma prévia verificação da solução escolhida através da realização de ensaios em modelo reduzido em túnel de vento.

4.3. Cargas devidas ao tráfego

O conhecimento das sobrecargas devidas ao tráfego reveste-se de grande utilidade, permitindo identificar as cargas mais significativas, o que se torna particularmente interessante se o sistema de monitorização dispuser de capacidade de aquisição dinâmica. Com efeito, nesse caso torna-se possível a obtenção de linhas de influência dessas cargas, caracterizando o desempenho da estrutura nessas circunstâncias e facilitando o despiste da sua eventual degradação. Reveste-se ainda de grande utilidade na gestão de pedidos de circulação de veículos especiais.

A pesagem de cargas rodoviárias pode ser efectuada através de balanças que permitem a pesagem dinâmica do tráfego, vulgarmente designada como “Bridge Weight in Motion”, bem como o registo do peso de cada eixo, da hora da medição e da velocidade de circulação (Deesomsuk e Pinkaew, 2010).

4.4. Ação sísmica

Em obras localizadas em zonas com acentuada sismicidade é do maior interesse a quantificação da intensidade sísmica recorrendo-se para tal à utilização de macrosismógrafos instalados no solo, junto à estrutura. Estes sensores permitem comparar a intensidade das acelerações medidas com os respetivos efeitos, o que se torna especialmente relevante se a monitorização da estrutura incluir uma componente dinâmica, permitindo assim uma comparação direta entre esta ação tão particular e a resposta da estrutura.

5. Caracterização dos materiais

Além da habitual caracterização do desempenho dos materiais realizado em laboratório, nas obras de grande dimensão importa dar especial atenção ao estudo do comportamento diferido do betão. De facto, os fenómenos diferidos do betão, nomeadamente a retração e a



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

fluência, têm uma importância significativa na concepção, dimensionamento, processo construtivo e comportamento em serviço de grandes estruturas de betão armado pré-esforçado, como é o caso das pontes estaiadas. As exigências atuais, cada vez mais severas, de desempenho da estrutura, a par de uma crescente complexidade estrutural e da existência de diferentes sistemas estruturais durante a construção, implicam a consideração adequada dos efeitos reológicos do betão para uma correta avaliação das alterações ao longo do tempo das deformações, dos esforços, das perdas de pré-esforço e dos movimentos das juntas de dilatação. De facto, erros na sua previsão podem ter como consequências deformações excessivas, fendilhação exagerada ou acentuada perda de pré-esforço, que poderá pôr em causa a durabilidade das obras ou, em casos extremos, a própria estabilidade.

A retração e a fluência do betão são fenómenos complexos que dependem de muitos fatores, uns inerentes ao próprio material e outros inerentes às condições a que é sujeito. Os vários modelos de previsão apenas fornecem, em geral, uma estimativa do valor médio destes fenómenos em função de valores médios da temperatura e da humidade relativa do ar em que o betão será mantido, caracterizando o material principalmente através da tensão de rotura. Assim, é frequente verificarem-se diferenças significativas entre as estimativas obtidas através dos modelos disponíveis e os valores medidos em obra. Assim, quando se trata de estruturas particularmente sensíveis aos efeitos da retração e da fluência do betão, justifica-se a avaliação *in situ* desses fenómenos.

Para a medição *in situ* da retração e fluência do betão das obras é usual o LNEC recorrer a provetes, fabricados com o mesmo betão da estrutura, que são colocados em zonas apropriadas da obra, de forma a estarem sujeitos às diferentes condições ambientais do betão da estrutura. No caso de pontes com tabuleiro em caixão os provetes são, em geral, colocados sobre o tabuleiro e no seu interior havendo assim informação relativa à retração e fluência do betão sujeito aos diferentes ambientes. Esses provetes, denominados por provetes compensadores de retração ou de fluência, têm no seu interior equipamento que permite medir a evolução no tempo das suas deformações.

Os prismas compensadores de retração não são sujeitos a nenhum carregamento e os provetes de fluência são sujeitos a uma tensão axial constante de compressão. Considerando a retração e a fluência do betão fenómenos independentes e válido o princípio da sobreposição de efeitos, a deformação por fluência do betão é igual à diferença entre a variação da deformação ao longo do tempo de um provete carregado, excluindo as deformações elásticas, e a deformação de um provete idêntico não carregado, conservados nas mesmas condições ambientais, durante o mesmo período de tempo.

Na Figura 10 apresentam-se as extensões medidas em provetes compensadores de retração com 300mm de espessura equivalente da ponte Salgueiro Maia, assim como os valores obtidos através do modelo do Eurocódigo 2 para humidades relativas do ar constantes de 60% e 80%. Estes provetes encontram-se, uns no interior do caixão, e outros no exterior, sendo bem nítido que os provetes mantidos no interior, protegidos das molhagens, apresentam maiores valores de retração. Em ambos os ambientes verifica-se um comportamento sazonal da retração do betão associado às condições climáticas locais.

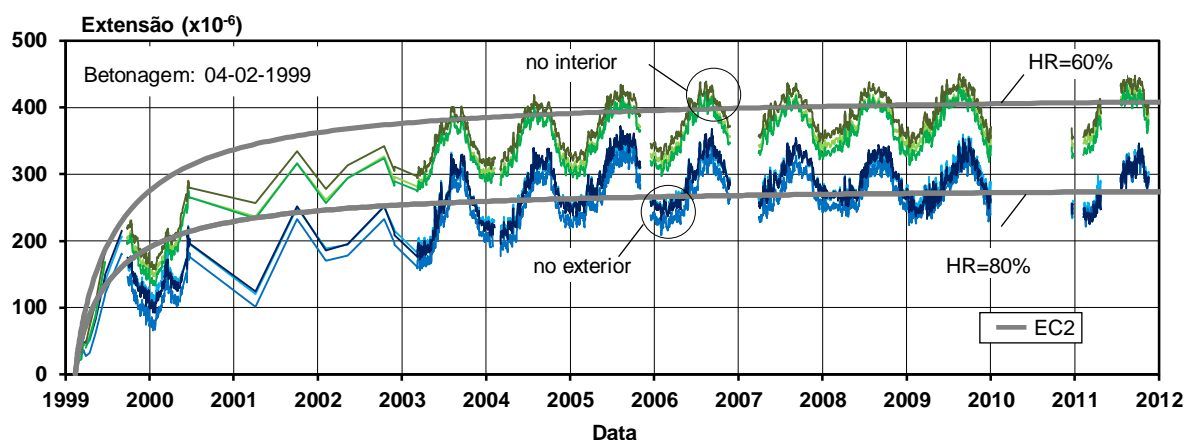


Figura 10 – Extensões medidas nos provetes termo-higrométricos (Ponte Salgueiro Maia)

6. Caracterização da resposta estrutural

As grandezas que, de uma forma geral, são objeto de medição no âmbito de um sistema de monitorização da integridade estrutural de uma ponte estaiada são deslocamentos verticais do tabuleiro, deslocamentos horizontais das torres, rotações, variação da abertura das juntas de dilatação e medição das forças instaladas nos tirantes. Para além destas grandezas, quando se pretende realizar a monitorização da resposta dinâmica da estrutura, é usual a medição de acelerações em diversos pontos do tabuleiro e das torres.

Os deslocamentos verticais do tabuleiro, bem como os deslocamento horizontais das torres, são grandezas que, pela sua globalidade, são relevantes na caracterização da resposta de uma ponte estaiada. Em função das dimensões e características de rigidez destas pontes, estes deslocamentos assumem usualmente valores bastante mais expressivos do que nas pontes tradicionais, pelo que surgem algumas especificidades nesta medição. Os métodos mais utilizados na medição dos deslocamentos verticais do tabuleiro, passíveis de ser integrados num sistema de monitorização, são nivelamento hidrostático, métodos geodésicos e GNSS/GPS.

O sistema de nivelamento hidrostático associado a células de pressão permite a monitorização de deslocamentos verticais do tabuleiro com uma precisão de 0,5 mm. É um sistema que o LNEC utilizou pela primeira vez nos ensaios de carga da ponte Salgueiro Maia (Santos *et al*, 2004) e que, desde então, tem sido utilizado com sucesso, tanto na monitorização do comportamento em serviço, como no decurso de ensaios de carga (Santos e Xu, 2007; Santos *et al*, 2010). É um sistema particularmente interessante em tabuleiros em caixão, no interior do qual fica protegido de vandalismo e dos agentes ambientais, como o vento e a radiação solar. Este sistema é constituído por um depósito com uma célula de referência associada, colocados num ponto considerado fixo, e por uma célula de pressão em cada ponto onde se pretende realizar a medição. O deslocamento é medido através da variação de pressão correspondente à altura da coluna de água entre a superfície do depósito e a célula em causa, descontando as eventuais variações de pressão na célula de referência.



Os meios geodésicos tradicionais permitem a medição dos deslocamentos verticais do tabuleiro através de níveis, de teodolitos e, mais recentemente, de taqueómetros motorizados, vulgarmente designados por “estações totais”. Estas têm a enorme vantagem de permitirem a medição de forma automática dos deslocamentos verticais do tabuleiro e dos deslocamentos horizontais das torres, exigindo apenas um alvo reflector em cada ponto alvo (Figura 11). Contudo, a sua utilização de forma permanente não é comum, devido à dificuldade em garantir a sua proteção ao vandalismo ou furto.

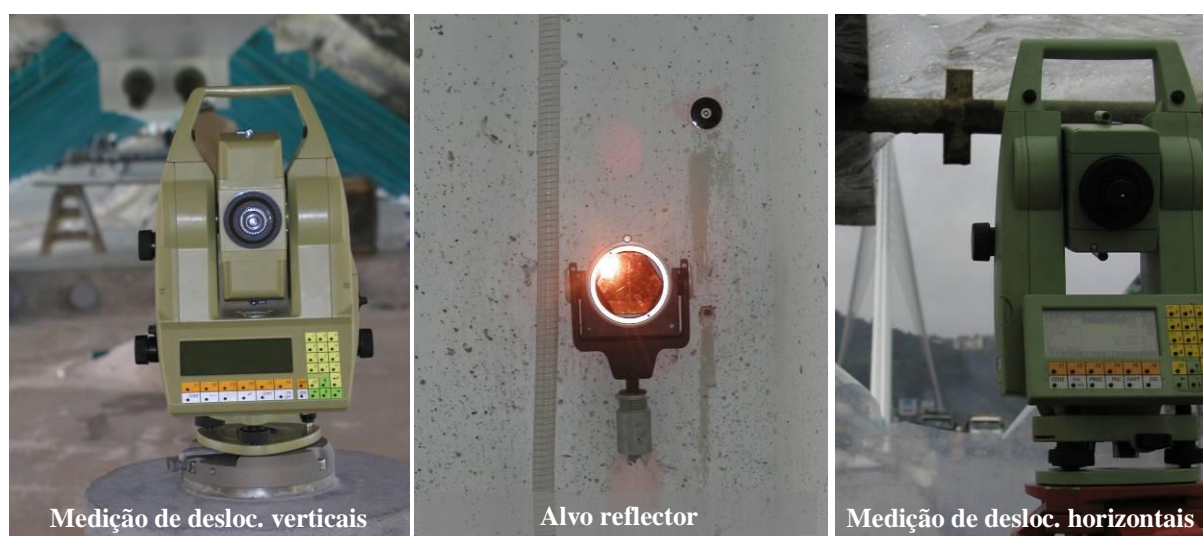


Figura 11 – Utilização de estações totais para a medição de deslocamentos verticais do tabuleiro e horizontais das torres (Ponte Rainha Santa Isabel)

O nivelamento geométrico de precisão afigura-se como uma opção interessante pela economia do investimento inicial, exigindo uma campanha sempre que se pretendam realizar medições. Todas as pontes monitorizadas pelo LNEC têm uma rede de bases de nivelamento instalada, mesmo nas obras que dispõem de um sistema de nivelamento hidrostático.

A sigla GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é atualmente adotada para designar os equipamentos que recebem, descodificam e processam os sinais do GPS (EUA), GLONASS (Rússia), Galileo (UE), etc. O GNSS, que é conhecido pela sua versatilidade, exatidão e operacionalidade sob quaisquer condições meteorológicas, permite a medição de movimentos de pequena amplitude quer de baixa frequência quer de elevada frequência (até 100Hz). Estas características permitem a utilização do GNSS numa grande gama de aplicações, nomeadamente, na monitorização de vibrações ambientais (tráfego e vento), na monitorização dos movimentos do topo das torres e no tabuleiro, bem como na monitorização de vibrações sísmicas. A máxima precisão deste sistema, para além de depender da qualidade das antenas utilizadas, pode ser melhorada de forma significativa com a colocação de uma estação GNSS situada no exterior da ponte, designada por estação de referência, e vai permitir operar o GNSS em modo relativo – o modo mais preciso (Lima e Henriques, 2009, 2011).

A variação da abertura de juntas de dilatação é uma grandeza que também reflete o comportamento global da estrutura. Tratando-se de uma grandeza muito influenciada pela onda térmica anual, a mais-valia da sua monitorização em contínuo é significativa, permitindo



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

verificar o seu correto funcionamento face às variações de temperatura medidas. Finalmente, o conhecimento dos movimentos acumulados da junta é também importante em termos de conservação, permitindo detetar alterações de comportamento decorrentes de eventuais anomalias. O procedimento usual do LNEC passa pela instalação nas juntas de ambos os encontros, de dois transdutores de deslocamento magneto-strictivos, que permitem a realização automática das medições, com uma precisão superior a 1 mm. Em complemento são também instaladas bases de telescópio, para a realização de medições no decurso de campanhas de observação, garantindo, de forma económica, redundância de medições.

A medição das rotações proporciona uma informação muito significativa relativamente ao desempenho estrutural. Para este efeito, assumem particular relevo as rotações no topo das torres, onde ocorrem as maiores rotações, e na sua base, para despiste de alguma anomalia nas fundações, bem como ao longo do tabuleiro, em secções que dependem das características específicas de cada obra. Existem diversos sensores disponíveis para este efeito, tendo-se recorrido a servo clinómetros que permitem a medição automática das rotações em duas direções ortogonais com uma resolução superior a 1 segundo sexagesimal.

A medição de extensões não apresenta características particulares nas pontes estaiadas, ressaltando-se a elevada compressão que se verifica no tabuleiro na proximidade das torres e a significativa variação de tensões que ocorre durante a construção. Ao vasto rol de soluções disponíveis, destacam-se os extensómetros de corda vibrante, eléctricos de resistência e de fibras ópticas. Os primeiros têm comprovada capacidade em termos de estabilidade e durabilidade – os sensores colocados nas pontes do Guadiana e do Arade continuam a funcionar ao fim de mais de 20 anos – apresentam a limitação de não permitir a medição em regime dinâmico.

Os tirantes são um elemento estrutural específico das pontes estaiadas assumindo um papel decisivo no desempenho estrutural destas obras. Assume por isso o maior interesse a avaliação da força suportada por estes elementos. Existem diversos métodos disponíveis para este efeito: células de carga que fazem a medição da força efetivamente suportada por todo o tirante, com grande vantagem em termos de precisão mas com custo muito elevado; células de carga monocórdão, que tiram partido do facto de todos os cordões de um tirante estarem, supostamente, à mesma tensão (Figura 12); o denominado método da vibração, que permite a avaliação da força a partir da medição da frequência de vibração dos tirantes. A utilização de células monocórdão é uma solução competitiva para integrar num sistema de monitorização, sendo necessário proceder à sua instalação em simultâneo com a montagem do tirante. O método da vibração, inicialmente apenas utilizado no âmbito de campanhas esporádicas de medição, também tem vindo a ser integrado em sistemas permanentes de monitorização.

A medição de acelerações é a base da generalidade dos sistemas de monitorização do comportamento dinâmico das estruturas. Para esse efeito, é usual o recurso a acelerómetros ou, em alternativa, a macro-sismógrafos (Figura 13), existindo actualmente grande diversidade de ambos os tipos de sensores. A caracterização global do comportamento dinâmico de uma estrutura pressupõe uma distribuição dos sensores ao longo da sua extensão, com uma densidade que permita obter a adequada configuração dos diferentes modos de vibração.

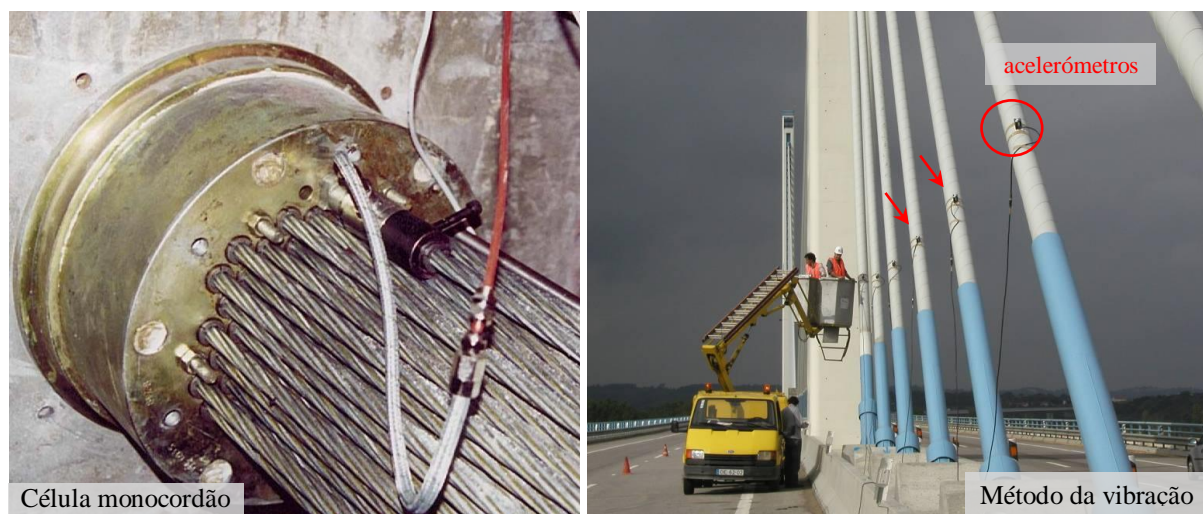


Figura 12 – Medição da força instalada em tirantes (Ponte Salgueiro Maia)

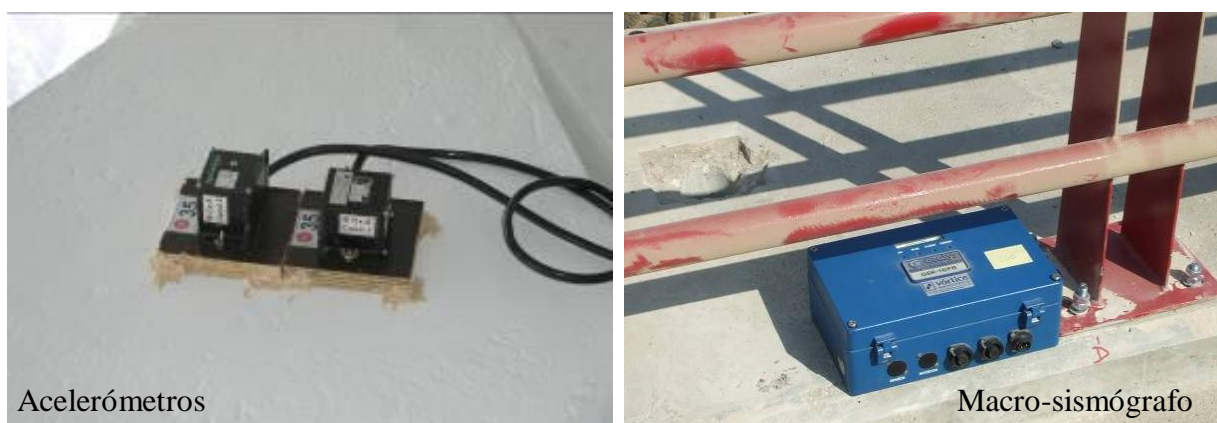


Figura 13 – Equipamento utilizado em ensaios de caracterização dinâmica

7. Ensaios de carga

7.1. Ensaios estáticos

A realização de ensaios de carga no final da construção é sempre do maior interesse para a caracterização do comportamento estrutural da obra de arte, permitindo medir a resposta da estrutura para cargas significativas, cujo intensidade e posicionamento são controlados. Por estas razões, é prática comum a realização de ensaios de carga estáticos e dinâmico em estruturas com a importância das pontes estaiadas, tal como sucedeu nas cinco pontes referidas neste trabalho (Fernandes *et al*, 1996, Santos *et al*, 2004, 2007, 2010).

Os ensaios estáticos são, usualmente, realizados com dois tipos de carregamento: carga concentrada constituída por uma linha de camiões carregados, ocupando toda a largura da faixa de rodagem, e carga distribuída, constituída por um número elevado de camiões dispostos num número de colunas compatível com a largura do tabuleiro. A carga concentrada



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

permite a determinação experimental das linhas de influência das diversas grandezas observadas, a carga distribuída visa a avaliação da resposta da estrutura quando submetida a uma carga com uma intensidade muito significativa. Na Figura 14 apresentam-se duas fases do ensaio da Ponte 4 de Abril, uma com a carga concentrada e a outra distribuída constituída por dezasseis camiões carregados perfazendo uma carga total de 5 100 kN. A Figura 15 é apresentada a deformada do tabuleiro desta ponte quando a carga máxima estava sobre a parte central do tramo principal, obtida através de um modelo de cálculo, assim como os valores do deslocamento medidos em sete seções.



Figura 14 – Ensaio de carga estático da Ponte 4 de Abril, em Angola

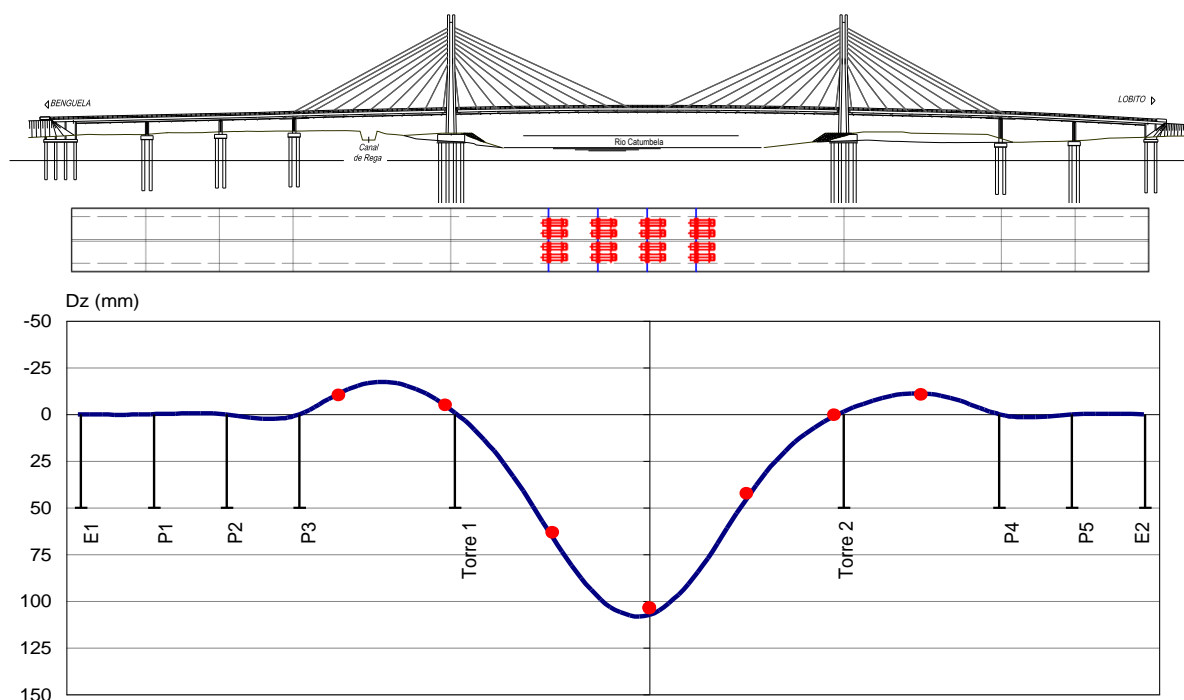


Figura 15 – Deformada do tabuleiro no ensaio de carga estático da Ponte 4 de Abril



7.2. Ensaios dinâmicos

Os ensaios em regime dinâmico permitem a determinação experimental das características dinâmicas mais importantes das estruturas, designadamente, a configuração e a frequência própria dos principais modos de vibração, bem como os coeficientes de amortecimento. Uma vez que estas características dinâmicas dependem da rigidez e da massa das estruturas, a sua identificação experimental permite a calibração de modelos a utilizar na sua análise e para a caracterização do seu comportamento, podendo servir de referência para futura avaliação desse comportamento.

Estes ensaios dividem-se em ensaios de vibração forçada, ensaios em regime livre e ensaios ambientais, sendo os dois últimos mais correntes nas estruturas de grande dimensão, como as pontes estaiadas.

Nos ensaios de vibração forçada a estrutura é excitada recorrendo, por exemplo, a geradores de vibrações servo-hidráulicos, ou mecânicos de massas excêntricas, ou ainda a equipamentos de aplicação de impulsos. Este tipo de ensaios, para além da pesada e onerosa logística, apresenta sérias dificuldades em excitar os modos de baixas frequências, razões que justificam a sua pouca utilização em pontes estaiadas.

Nos ensaios em regime livre é imposta uma deformação inicial a qual é retirada instantaneamente ficando a estrutura a vibrar em regime livre. É um tipo de ensaios muito adequado para a avaliação dos coeficientes de amortecimento. A Figura 16 inclui uma vista dos ensaios realizados na Ponte Internacional do Guadiana em que foi libertada de forma brusca a massa suspensa visível na figura, tendo proporcionado os resultados que se apresentam, nos quais é evidente o efeito do amortecimento.

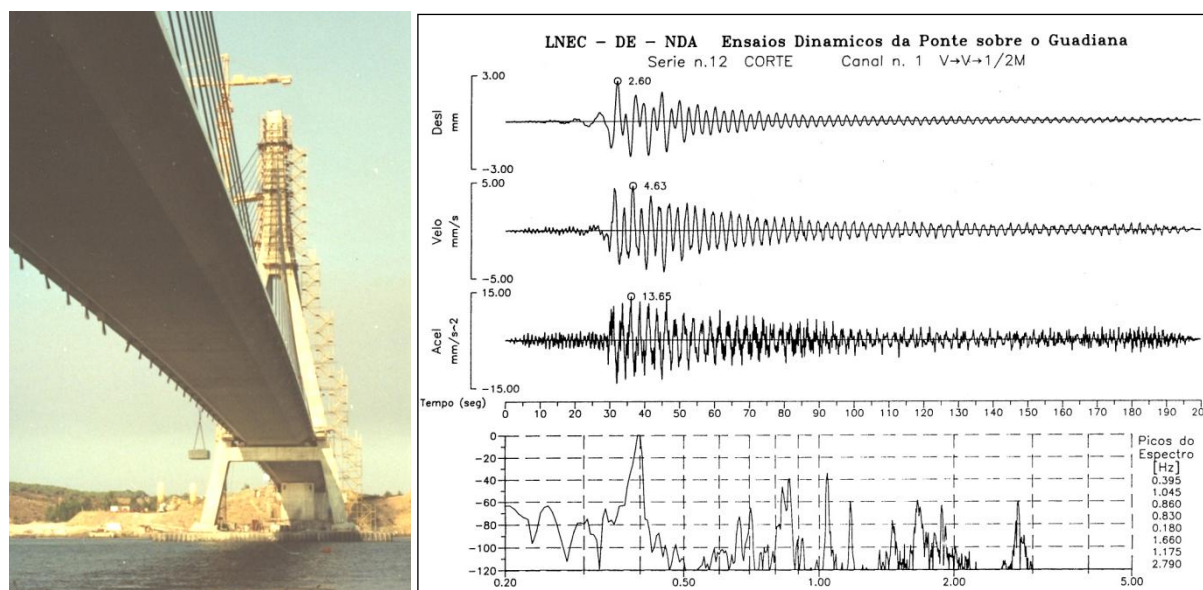


Figura 16 – Ensaio em regime livre: libertação de carga na Ponte Internacional do Guadiana (Branco *et al*, 1993)



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

Os ensaios dinâmicos ambientais consistem na medição das acelerações induzidas pelo vento ou pelo tráfego decorrente da utilização da ponte. Estes ensaios apresentam como grande vantagem dispensarem a mobilização de meios de excitação, podendo inclusive ser realizados sem interrupção do tráfego. Por outro lado, exigem uma elevada sensibilidade dos acelerómetros e uma excelente resolução do sistema de aquisição de dados, uma vez que a amplitude das respostas induzidas pelas ações ambientais pode ser muito reduzida.

Para obter as características dinâmicas globais de uma estrutura de grandes dimensões é possível realizar os ensaios de medição de acelerações em várias etapas, correlacionando os resultados obtidos nas diferentes etapas através de pontos de referência fixos. A duração dos registos é definida em função das frequências próprias esperadas e as diferenças entre elas.

O processamento dos registos de acelerações é realizado através de métodos de identificação modal (Rodrigues, 2004). Na Figura 17 estão assinaladas as frequências nos picos de ressonância que têm expressão na maioria dos registos e que constituem possíveis modos de vibração da estrutura.

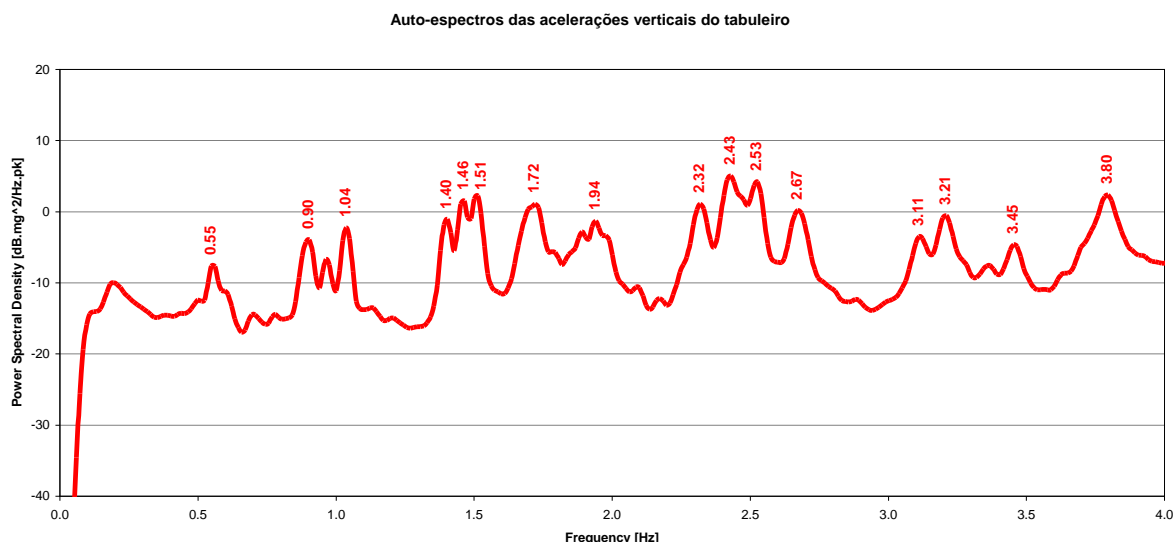


Figura 17 – Identificação das frequência naturais do tabuleiro (Ponte 4 de Abril)

Na tabela 2 apresentam-se as frequências dos primeiros modos de vibração vertical, transversal e de torção do tabuleiro, identificadas a partir dos ensaios dinâmicos das cinco pontes ensaiadas.

Tabela 2 – Frequências dos 1^{os} modos de vibração do tabuleiro

Ponte	1 ^o modo vertical	1 ^o modo transversal	1 ^o modo de torção
Guadiana	0,40 Hz	-	-
Arade	0,36 Hz	0,25 Hz	1,03 Hz
Salgueiro Maia	0,43 Hz	0,66 Hz	0,92 Hz
Rainha Santa Isabel	0,52 Hz	1,53 Hz	0,79 Hz
4 de Abril	0,55 Hz	0,70 Hz	1,04 Hz



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

8. Considerações finais

O objectivo desta comunicação foi partilhar a experiência do LNEC no âmbito da monitorização de pontes estaiadas. Nesse sentido, foram referidas as especificidades inerentes a este tipo de pontes, as grandezas mais relevantes na monitorização do seu comportamento estrutural, bem como os aspetos mais promissores da evolução dessa monitorização.

A prática adotada na monitorização dessas pontes, iniciou-se durante a construção, incluiu a realização de provas de carga estáticas e dinâmicas no final da construção e posteriormente o seu acompanhamento em serviço. Chama-se a atenção para o facto dos períodos de observação de algumas destas pontes serem superiores a 20 anos, o que reflete a experiência e sucesso do trabalho desenvolvido na observação a médio e longo prazo do comportamento destas estruturas.

É previsível que a monitorização tenda a ser progressivamente baseada na automatização das medições, do pré-processamento e do armazenamento dos resultados obtidos em bases de dados em servidores externos às obras. Existe também uma tendência para que estas bases de dados sejam acessíveis via *web* aos diversos intervenientes na gestão da obra, através de *software* especialmente desenvolvido, com recurso a ferramentas estatísticas ou numéricas, para acompanhar o comportamento estrutural com vista à detecção de danos ou anomalias estruturais.

A integração do sistema de monitorização no sistema de gestão de obras de arte é inevitável, permitindo uma maior utilização da informação experimental na conservação das obras de arte, com benefícios claros em termos de segurança, economia e durabilidade.

9. Referências

- BRANCO, F.; AZEVEDO, J.; RITTO-CORRÊA, M.; COSTA, A. CAMPOS. Estudo do comportamento dinâmico da ponte Guadiana, em Vila Real de Santo António, *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, LNEC, pp. 241-256, 1993.
- BRICKER, R., ZHANG, L., ANDERSEN, P., Modal Identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10, pp. 441-445, 2001.
- FERNANDES, J. A.; BRANCO, F.; SANTOS, L. O.; SANTOS, TERESA O. Provas de carga das pontes atirantadas do Algarve, in *Mecânica Experimental*, pp. 51-60, 1996.
- GLISIC, B.; INAUDI, D. *Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons Lda, 2007.
- LIMA, J. N.; HENRIQUES, M. J.. Monitorização da Deformação de Pontes com o GNSS. *1º Congresso Nacional de Segurança e Conservação de Pontes*. Actas do congresso, Lisboa, II- 143 a 151, 2009.
- LIMA, J. N.; HENRIQUES, M. J. A Utilização do GNSS com Elevada Frequência de Amostragem na Monitorização de Estruturas. *VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*, Ordem dos Engenheiros. Actas da Conferência. Porto, 2011.
- MARTINS, J. CÂNCIO. Ponte Internacional sobre o Guadiana em Castro Marim. *Pontes Atirantadas do Guadiana e do Arade*, LNEC, pp. 3-15, 1993.
- MARTINS, J. L. CÂNCIO; SILVEIRA, J. PACHECO – “Nova ponte sobre o rio Tejo em Santarém e Viadutos de acesso”, *Betão Estrutural 2000*, FEUP, pp. 889-898, 2000.



V CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS

REALIZAÇÃO:



SOLUÇÕES INOVADORAS PARA PROJETO, EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO | RIO DE JANEIRO | 6 A 8 DE JUNHO DE 2012

- RITO, ARMANDO. A ponte sobre o rio Arade na Variante à EN 125 em Portimão. *Pontes Atirantadas do Guadiana e do Arade*, LNEC, pp. 69-96, 1993.
- RITO, ARMANDO; CABRAL, PEDRO; XAVIER, LUÍS. A Nova Ponte sobre o rio Catumbela, em Angola”, *Encontro Nacional Betão Estrutural 2008*, Guimarães, 2008.
- RITTO-CORRÊA, M.; COSTA, A. CAMPOS. Ensaio dinâmico da Ponte sobre o Rio Arade, *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, LNEC, pp. 225-240, 1993
- RODRIGUES, J. Identificação modal estocástica. Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto, 2004.
- RODRIGUES, J.; XU, M.; SANTOS, L. O. Modal identification from ambient vibration tests on a cable-stayed bridge, *Eurodyn 2005*, Paris, France, 2005.
- SANTOS, C. P.; FERNANDES, J. A.; SANTOS, L. O. Estudo do comportamento térmico de tirantes, *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, LNEC, pp. 185-194, 1993.
- SANTOS, J. P., SANTOS, L. O., SILVEIRA, P., Processamento de dados em tempo real no controlo da segurança da Ponte de São João. *ASCP'09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP*, Lisboa, 2009.
- SANTOS, J. P., SILVEIRA, P., SANTOS, L. O., CALADO, L., Monitoring of Road Structures – Real Time Acquisition and Control of Data, *16th IRF World Road Meeting*, Lisboa, 2010.
- SANTOS, L. O.; XU, M.; FERNANDES, J. A.. Ensaio de carga da Ponte Salgueiro Maia, *Encontro Nacional Betão Estrutural 2004*, Lisboa, 2004.
- SANTOS, L. O.; XU, M. Load Tests of a Cable-Stayed Bridge in Coimbra, Portugal, *Structural Engineering International*, Vol. 17, Nº 4, pp. 337-341, Nov. 2007.
- SANTOS, L. O.; XU, M.; SILVEIRA, P.; ABRIL, M. M. Observação e ensaio da Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela em Angola, *Encontro Nacional Betão Estrutural 2010*, Lisboa, 2010.
- DEESOMSUK, T; PINKAEW, T., Evaluation of effectiveness of vehicle weight estimations using bridge weigh-in-motion, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3:2, 96-110, 2010.
- WONG, K.-Y.; NI, Y.-Q. Modular Architecture of SHM System for Cable-supported Bridges. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, Chapter 123, Edited by Christian Boller, Fu-Kuo Chang and Yozo Fujino, John Wiley & Sons, 2009.