



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Monitoramento e ensaio de pontes

Luís Oliveira Santos¹

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, luis.osantos@lnec.pt

Resumo

O monitoramento e ensaio de pontes é uma atividade com uma forte base experimental, cuja utilidade tem vindo a suscitar o interesse crescente de projetistas e responsáveis pela gestão de parques de obras de arte. Os requisitos para esta atividade têm aumentado nas últimas décadas, alargando-se às questões associadas com a durabilidade dos materiais e das estruturas, o que tem estimulado novos desenvolvimentos.

Nesta comunicação apresenta-se uma resenha histórica do monitoramento de pontes, baseada na experiência do LNEC, apontando algumas especificidades e sistematizando a evolução verificada na sua conceção e implementação. Salienta-se a capacidade atualmente existente para medição das mais diversas grandezas, bem como para o seu processamento, transmissão e disponibilização, perspetivando-se os aspetos mais promissores da evolução desta atividade. São ainda, enquadrados os diversos tipos de ensaios de pontes, tanto estáticos como dinâmicos, indicando as principais vantagens e limitações a eles associadas.

Palavras-chave

Monitoramento da integridade estrutural; monitoramento da durabilidade; ensaio estático; ensaio dinâmico; comportamento diferido do betão, pontes.

Introdução

O monitoramento do comportamento de uma estrutura é uma forma privilegiada de avaliação do seu desempenho com base em valores diretamente medidos *in situ*, permitindo a verificação das teorias de comportamento estrutural consideradas na modelação e análise dessa estrutura, bem como a deteção precoce de eventuais deficiências estruturais. Consiste na recolha periódica e organizada de informação, seguida de uma análise sistemática dessa informação.

A utilidade do monitoramento estrutural está desde logo associada à segurança. Com efeito, a deteção prematura de comportamentos anómalos reduz o risco de colapso súbito, contribuindo assim para a preservação de vidas humanas e de bens materiais. Também no caso de ocorrência de um evento extremo, como um sismo, incêndio de veículos ou a sua colisão com elementos estruturais, a informação recolhida através do sistema de monitoramento permite antecipar e fundamentar juízos sobre as consequências desse evento para a estrutura e sobre as condições de segurança remanescentes.

Outra mais-valia do monitoramento estrutural, que ganha crescente relevância, prende-se com a utilização da informação obtida para uma programação mais eficiente das ações de manutenção, tornando-se assim possível prolongar a vida útil de uma estrutura, minimizando os custos diretos associados a intervenções e os custos indiretos decorrentes de restrições de funcionamento.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Embora exista grande diversidade de situações específicas, alguns dos casos em que o monitoramento é mais benéfico são os seguintes (Inaudi, 2009): estruturas novas em que são utilizadas soluções estruturais, materiais ou processos construtivos inovadores; estruturas novas em que haja incertezas significativas relativamente às condições geotécnicas, qualidade dos materiais ou da mão de obra, risco sísmico, agressividade ambiental ou vulnerabilidade durante a construção; estruturas críticas, pela sua importância econômica ou social; estruturas tipo; estruturas existentes com deficiências identificadas ou cuja condição suscite dúvidas.

Com maior visibilidade nos últimos anos, o monitoramento estrutural é uma atividade com uma longa tradição, na qual o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem estado envolvido desde a sua fundação em 1946. Ao longo destas décadas, esta atividade tem tido uma intensidade crescente, fruto do progressivo interesse dos *stakeholders* e do significativo incremento de obras de arte construídas, e que muito tem beneficiado com o acentuado desenvolvimento tecnológico dos últimos anos. Por outro lado, a evolução desta atividade tem acompanhado as crescentes preocupações da comunidade técnica e científica relativamente ao desempenho das obras em termos de segurança, utilização e durabilidade.

Neste contexto afigura-se oportuno fazer uma resenha histórica do monitoramento e ensaio de pontes, baseada na experiência do LNEC, precedendo uma caracterização da situação atual e das perspetivas de evolução.

Resenha histórica

Pioneirismo

Numa fase inicial, que se pode considerar delimitada entre meados das décadas de 40 e de 70 do século passado, o monitoramento e ensaios de pontes caracterizou-se pelo estabelecimento do próprio conceito de observação do comportamento estrutural, pela conceção de técnicas e equipamentos adequados e pela própria execução ou adaptação de equipamentos. Acresce que nesse período os meios de cálculo eram diminutos, pelo que era comum o recurso a modelos reduzidos para análise de estruturas mais complexas. Nessas condições, a informação obtida através do monitoramento era da maior relevância inclusive para a verificação da segurança.

Desde cedo que as principais grandezas medidas foram deslocamentos lineares, rotações, variações da abertura de juntas, extensões e temperaturas. A maioria dos equipamentos eram mecânicos, progressivamente complementados com equipamentos elétricos de resistência, de corda vibrante e pares termo-elétricos.

Os primeiros trabalhos neste domínio efetuados pelo LNEC foram apresentados internacionalmente por Rocha (1955) e referem-se, entre outros, às observações de uma ponte em arco sobre o rio Sousa, da ponte de Santa Clara, em Coimbra, constituída por cinco tramos contínuos, e da ponte de Vala Nova, uma obra com três tramos contínuos em betão armado pré-esforçado. Posteriormente, merecem uma referência particular os estudos efetuados na ponte da Arrábida (Marecos, 1963), na ponte 25 de Abril (Marecos *et al*, 1969) e na ponte Rio-Niterói (Marecos *et al*, 1975).



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Na ponte Rio-Niterói foi instrumentado um trecho do tabuleiro em concreto protendido com 480 m de extensão, compreendido entre os pilares P88 e P95. Foi efetuado um estudo *in situ* do comportamento diferido do betão, através de provetes colocados nas almas do caixão, de forma a estarem expostos às mesmas condições que as paredes do caixão, isto é, simultaneamente expostos ao ambiente do exterior e do interior do caixão (Figura 1a). Foram igualmente embebidos no interior do betão extensómetros de corda vibrante (Figura 1b) e pares termoelétricos. Para medição dos deslocamentos verticais do tabuleiro foram montadas bases de nivelamento nas secções de meio vão e de apoio.

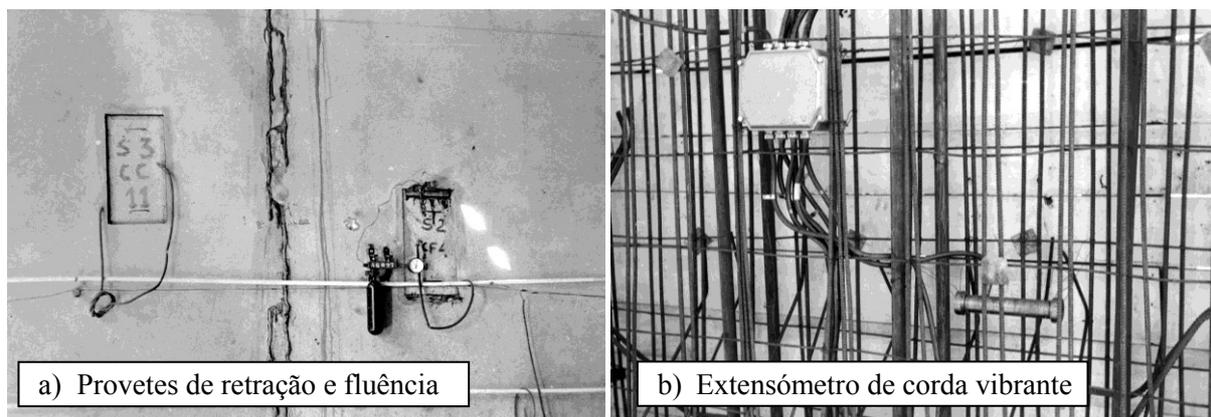


Figura 1 – Instrumentação da Ponte Rio-Niterói

Nos diversos pilares deste trecho foram instaladas fios de prumo que, associados a bases para coordenómetro, permitiam medir os deslocamentos horizontais relativos entre a base e o topo de cada pilar. Nas secções de base e de topo dos pilares foram ainda instaladas bases para a medição das rotações através de clinómetros de bolha de ar (Figura 2). No final da construção realizaram-se ensaios de carga (Figura 3).

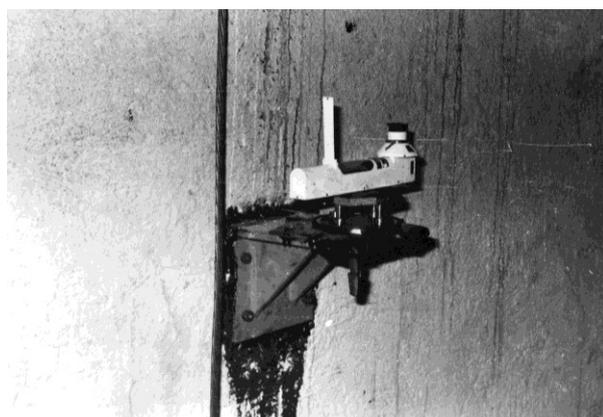


Figura 2 – Ponte Rio-Niterói: clinómetro de bolha



Figura 3 – Ensaio de carga da Ponte Rio-Niterói



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Sistematização

O período compreendido entre meados das décadas de 70 e de 90 do século passado foi caracterizado por um progressivo incremento do volume de construção, nomeadamente ao nível das infraestruturas rodoviárias.

Do ponto de vista do monitoramento de pontes, assistiu-se a um grande aumento da oferta de equipamentos e a uma consolidação de técnicas e equipamentos de medição. No entanto, tal como no período anterior, a realização de medições era realizada no âmbito de campanhas de observação periódicas. A evolução dos equipamentos permitiu a diminuição das suas dimensões, o aumento da sua fiabilidade e estabilidade. De facto, ainda hoje mantêm-se em funcionamento grande parte dos extensómetros de corda vibrante, termómetros de resistência ou termo pares então instalados. O incremento da esbelteza das obras de arte e do recurso ao pré-esforço tornou necessária uma alteração do procedimento relativamente aos provetes para o estudo *in situ* da retração e da fluência que continuaram a ser mantidos em obra mas colocados no interior do caixão e sobre o tabuleiro.

Neste período foram instrumentadas, mantendo-se desde então a observação do seu comportamento estrutural, a ponte de São João (Figura 4), as pontes estaiadas do Guadiana e do Arade (Figura 5), todas concluídas em 1991, a ponte sobre o rio Sado em Alcácer (1992), a ponte internacional de Valença (1993), a ponte sobre o rio Angueira (1995) e a ponte do Freixo no Porto (1995), todas em concreto protendido.



Figura 4 – Ponte de São João

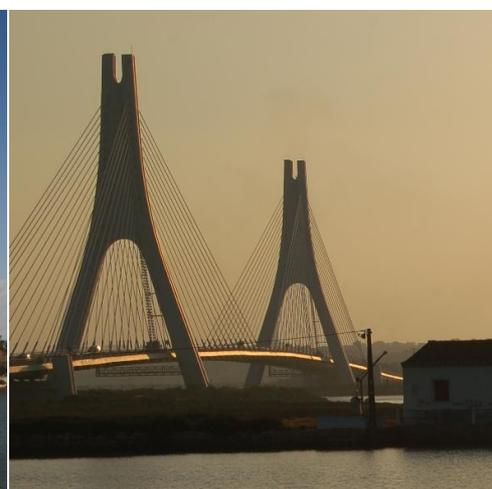


Figura 5 – Ponte do Arade

Automatização

A introdução de sistemas de aquisição, permitindo a realização das medições de forma automática, marcou uma profunda alteração de procedimentos. Com efeito, tornou-se assim possível, sem a presença de operadores, proceder à aquisição de forma regular, garantir a simultaneidade de leituras em diversos pontos e, conseqüentemente, a compatibilidade das diversas grandezas medidas, bem como possibilitar uma melhor comparação com os modelos



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



de análise. Tornou-se, ainda, possível o acesso remoto à informação armazenada nestes sistemas de aquisição.

A automatização das medições conduziu a um aumento muito significativo da informação obtida e, conseqüentemente, a um maior conhecimento sobre o comportamento das obras. A importância dos benefícios decorrentes da automatização levou à progressiva utilização de sensores que permitem medições automáticas em detrimento dos restantes.

A primeira obra em que o LNEC utilizou estes sistemas de aquisição foi a Ponte Miguel Torga, sobre o rio Douro, na Régua, que entrou ao serviço em 1998, após a realização de ensaios de carga (Figura 6). Neste período, em Portugal continuou-se a assistir a um elevado ritmo de construção, destacam-se ainda a instrumentação, ensaio e monitoramento da estrutura de prolongamento da pista do aeroporto Internacional da Madeira, concluído em 2000 (Figura 7) e das pontes estaiadas Salgueiro Maia (2000) e Rainha Santa Isabel (2004).



Figura 6 – Ponte Miguel Torga

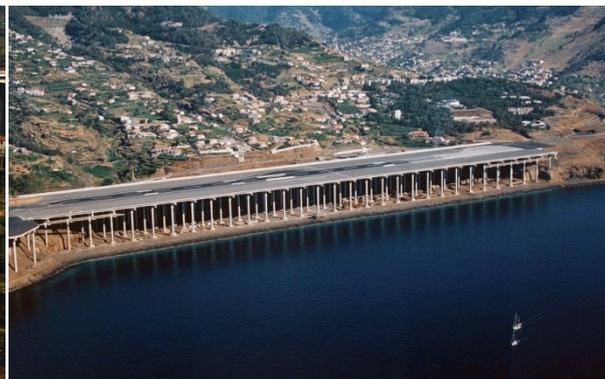


Figura 7 – Aeroporto da Madeira

Na Ponte Salgueiro Maia instalaram-se pela primeira vez um sistema de nivelamento hidrostático associado a células de pressão para medição de deslocamentos verticais (Figura 8) e diversas células monocordão para a medição das forças nos estais (Figura 9).



Figura 8 – Célula de pressão de um sistema de nivelamento hidrostático



Figura 9 – Célula monocordão para a medição das forças nos estais



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Ao nível dos sensores, para além do progressivo aperfeiçoamento dos existentes, surgem aplicações de novos tipos de sensores às estruturas de engenharia civil, entre os quais se destacam os sensores em fibra óptica (Félix, 2004; Glisic & Inaudi, 2007), que se distinguem pela total imunidade aos efeitos electro-magnéticos, tendo como inconveniente a necessidade de sistemas de aquisição específicos.

Globalização

Este período, iniciado há cerca de dez anos, é caracterizado por uma enorme oferta de equipamentos, aptos a medir as mais diversas grandezas, permitindo, para além da avaliação do comportamento estrutural, a caracterização de acções e da durabilidade. Por outro lado, o elevado volume de dados proporcionado pela aquisição automática conduziu a uma progressiva necessidade de armazenamento desta informação em bases de dados, preferencialmente carregadas de forma automática e com processamento de dados associado. As facilidades de comunicação tornam viável a disponibilização desta informação via web.

Do ponto de vista da política de obras públicas, em Portugal verifica-se um acentuado abrandamento do ritmo de construção, o que conduziu parte significativa das empresas portuguesas a incrementarem a sua atividade no exterior. Este facto reflete-se nas novas pontes instrumentadas pelo LNEC: para além de uma obra de grande envergadura como a ponte ferroviária sobre o rio Sado, terminada em 2012, foram instrumentadas e ensaiadas as pontes 4 de Abril, na Catumbela, concluída em 2010 (Figura 10), e a ponte 17 de Setembro, na Cabala, em serviço desde 2012, ambas em Angola e instrumentadas em parceria com o Laboratório de Engenharia de Angola. Atualmente estão em construção o Viaduto Transrhmel, em Constantine, na Argélia, instrumentado por um consórcio que também integra as empresas Betoteste, Cêgê e Armando Rito Engenharia, e a ponte sobre a Ribeira D'Água, em Cabo Verde, cujo plano de monitorização será implementado em parceria com o Laboratório de Engenharia Civil de Cabo Verde.



Figura 10 – Ponte 4 de Abril, Angola



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



A concepção de um sistema integrado de monitoramento de uma ponte

O monitoramento de uma ponte muito beneficia, tanto em termos de custo como de eficiência, com uma abordagem integrada das diferentes vertentes que importa cobrir na obra em causa. Para este efeito, torna-se indispensável o adequado planeamento que deve estar presente na concepção do sistema de monitoramento como, posteriormente, na sua implementação.

A definição clara dos objetivos é uma primeira tarefa que, embora seja elementar, é da maior importância, condicionando todas as ações subsequentes.

Um segundo aspeto essencial prende-se com a identificação dos pontos críticos da estrutura, o que poderá ser feito com recurso a uma modelo numérico, sendo recomendável nesta fase alguma interação com o dono de obra, o projetista ou, no caso de estruturas existentes, os responsáveis pela sua conservação. Desta análise é possível identificar na resposta da estrutura as grandezas mais relevantes, a sua localização e a sua amplitude, por forma a caracterizar da melhor forma possível o comportamento estrutural e os efeitos provocados pelas ações e pelas variações dos materiais.

Considerando estes elementos, bem como os condicionamentos existentes (ambientais, estruturais, orçamentais), impõe-se então assumir um tipo de abordagem, estática ou dinâmica, bem como a periodicidade das medições. 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 de dados e uma cadeia de procedimentos e estratégias que permitam um adequado processamento dos dados.

A escolha dos sensores que satisfaçam os requisitos de cada obra é facilitada por uma abundante oferta de sensores, com diferentes tecnologias, que permitem medir uma grande diversidade de grandezas, com precisões e amplitudes distintas. Podem-se agrupar as diferentes grandezas em ações, comportamento diferido dos materiais, grandezas estruturais e grandezas associadas à durabilidade dos materiais.

Relativamente às ações é possível distinguir as ambientais, como a velocidade e direção do vento, a temperatura ou a humidade relativa, das ações associadas ao tráfego ou os sismos.

No caso do concreto, a necessidade de caracterização *in situ* da retração e da fluência, deve-se à grande influência que as condições ambientais têm na evolução desses fenómenos, verificando-se, em alguns casos diferenças significativas entre os valores dos modelos de previsão regulamentares e os valores experimentais (Santos, 2001).

As grandezas estruturais mais usualmente medidas são os deslocamentos verticais, as rotações, as extensões e as variações das aberturas das juntas de dilatação, a que se podem juntar a medição das forças em tirantes ou em cabos de pré-esforço exterior e, no caso de uma monitorização dinâmica, a medição de acelerações.

Uma vertente que tem assumido progressivamente importância prende-se com a questão da durabilidade, designadamente com a prevenção da corrosão nas estruturas de betão armado.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Para esse efeito são embebidos no betão sensores que medem parâmetros relevantes para a durabilidade das armaduras, designadamente:

- *potencial de corrosão*, ou seja o potencial de eléctrodo adquirido espontaneamente por um material que se corrói num ambiente particular, sendo a informação fornecida meramente qualitativa;
- *resistividade*, propriedade intrínseca dependente da capacidade do betão para transportar carga eléctrica, a qual, por sua vez, depende da natureza da estrutura porosa, da distribuição de água no betão, da concentração iónica na solução intersticial e da temperatura, podendo fornecer informações sobre a eficácia do betão de recobrimento na protecção das armaduras;
- *corrente galvânica* que se baseiam na medição da corrente que se estabelece entre um aço de construção e um metal mais nobre, em geral aço inoxidável, a qual é proporcional à velocidade de corrosão, variando de praticamente nula quando o aço se encontra no estado passivo para valores elevados quando ocorre despassivação (Pereira & Salta, 2006).

Em simultâneo com estas grandezas é sempre medida a *temperatura* pois este parâmetro influencia directamente a velocidade de corrosão das armaduras e as propriedades de transporte de agentes agressivos no betão de recobrimento.

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 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 do conjunto de componentes do sistema de aquisição de dados a instalar assim como de uma rede local (LAN) 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 necessário capacitar estes sistemas com autonomia relativamente à transmissão, processamento, disponibilização de dados *on-line* e em tempo real e verificação de anomalias.

A deteção automática da existência de danos, da sua localização, da sua identificação e extensão é possível com recurso a técnicas de *data mining* (extração de conhecimento de dados ou mineração de dados). São técnicas que, através de algoritmos de aprendizagem ou classificação baseados em redes neurais e estatística, exploram o conjunto dos valores medidos pelo sistema de monitoramento, evidenciando padrões nesses valores e, dessa forma, a eventual alteração desses padrões provocada pela ocorrência de um dano. São técnicas que se afiguram muito promissoras, sendo objeto de diversos trabalhos de investigação (Cury, 2006, Li & Ou, 2011, Prada, 2012; Santos *et al*, 2013; Santos *et al*, 2014).



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Ensaio de carga

Um ensaio de carga constitui uma oportunidade singular de aumentar de forma significativa o conhecimento sobre o comportamento de uma estrutura, tanto do ponto de vista da satisfação dos requisitos de utilização como em relação à sua capacidade resistente. Distinguindo-se ensaios estáticos e dinâmicos, pretende-se seguidamente enquadrar os diversos tipos de ensaios de carga de pontes, indicando as principais vantagens e limitações associadas.

Ensaio estático

Os ensaios de carga estáticos podem ser divididos em três tipos de acordo com os objectivos e o nível de carregamento envolvido (Ryall, 2010): ensaios à rotura (*collapse load testing*), provas de carga (*proof load testing*) e ensaios de diagnóstico (*supplementary load testing*). As cargas utilizadas são normalmente camiões carregados ou comboios, no caso das pontes ferroviárias, embora se possa recorrer a outras cargas, como depósitos de água ou sacos de cimento ou areia.

Os ensaios à rotura são realizados apenas em obras cuja demolição está decidida, sendo possível explorar toda a capacidade resistente da obra, permitindo a recolha de informação preciosa para posteriores estudos sobre comportamento estrutural, designadamente comportamentos não lineares, com benefícios mais evidentes quando existem outras obras semelhantes.

As provas de carga envolvem a aplicação incremental de cargas com o objectivo de determinar a máxima carga que a ponte pode suportar compatível com o seu funcionamento em regime linear. Evidentemente que a realização deste tipo de ensaios envolve um elevado risco de provocar danos, ou mesmo o colapso da estrutura, sendo necessário proceder a uma instrumentação detalhada e a uma análise cuidada da resposta da estrutura a cada incremento de carga, de forma a despistar indícios de um comportamento não linear ou anómalo. Estes ensaios são particularmente interessantes no domínio da avaliação da segurança de pontes existentes, na medida em que são mais conclusivos relativamente à capacidade resistente da obra de arte, permitindo a mobilização de reservas de resistência efectivas. Contudo, devido ao risco associado, o recurso a estes testes deve ser restrito aos casos em que não seja possível verificar a segurança da obra através de métodos numéricos e outros métodos experimentais, sendo uma última forma de tentar evitar a sua demolição.

Os ensaios de diagnóstico consistem na aplicação à estrutura de um carregamento conhecido, não superior ao resultante do tráfego existente, sem danificar a estrutura e, por maioria de razão, sem envolver riscos de colapso. Através da adequada instrumentação da obra, realizam-se as medições que permitam a caracterização do seu comportamento elástico, estabelecendo-se a comparação com o comportamento previsto pelo respectivo modelo numérico. Associados a estes ensaios são frequentemente realizados ensaios pseudo-estáticos, em que um veículo ou uma linha de veículos, com peso conhecido, se move muito lentamente ao longo da ponte, permitindo a determinação de linhas de influência experimentais.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Pelas razões expostas, a generalidade dos ensaios realizados, são do tipo diagnóstico. Com efeito, é comum a realização de ensaios de recepção no final da construção das pontes de maior dimensão, bem como de algumas obras correntes, neste caso escolhidas por amostragem. Desde a sua fundação o LNEC realizou centenas de ensaios de carga de pontes. A título exemplificativo apresenta-se na Figura 11 imagens de alguns dos ensaios realizados recentemente.



Figura 11 – Ensaio estático

Uma situação em que a realização destes ensaios se revela de grande utilidade é no âmbito da avaliação da segurança de pontes existentes. Embora sem dar uma indicação precisa sobre a capacidade de carga, uma vez que não é razoável a partir do comportamento linear extrapolar para níveis de carga que mobilizem um comportamento não linear, o recurso a um ensaio de carga permite aprofundar o conhecimento do comportamento estrutural da obra, da maior utilidade no âmbito da avaliação da segurança e da elaboração de um projecto de reabilitação, bem como na verificação da eficácia da reabilitação efectuada.

Como exemplo de uma obra nestas circunstâncias, ensaiada antes e após a sua reabilitação, refere-se o Viaduto da rua Ramalho Ortigão, em Lisboa (Figura 12).



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Figura 12 - Ensaios de carga antes e após a reabilitação

A calibração de um modelo numérico é uma mais-valia significativa da realização de um ensaio de carga. Com efeito, o desenvolvimento de um modelo numérico é condicionado pelas incertezas associadas a aspectos como as propriedades mecânicas reais dos elementos estruturais, a influência de elementos secundários, como o tapete betuminoso ou vigas de bordadura, o comportamento dos aparelhos de apoio ou efeitos estruturais não considerados, como o efeito de membrana ou efeito de arco (Ryall, 2010). Estes aspectos, sendo relevantes no comportamento de uma estrutura nova poderão ser decisivos num processo de avaliação da segurança de uma ponte existente, quando a utilização de métodos numéricos sofisticados se revelar insuficiente na verificação da segurança.

Ensaios dinâmicos

A realização de ensaios dinâmicos permite a determinação experimental das características dinâmicas de uma estrutura, designadamente, frequências e configurações dos principais modos de vibração, bem como coeficientes de amortecimento.

As técnicas de ensaio utilizadas permitem distinguir três tipos de ensaios dinâmicos: ensaios de vibração forçada, ensaios de vibração em regime livre e ensaios de vibração ambiente.

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. Trata-se de um tipo de ensaio que exige uma logística pesada, cuja aplicação a pontes não é comum. Apresenta, também, como inconveniente a dificuldade em excitar os modos associados a baixas frequências.

Nos ensaios de vibração em regime livre é imposta uma deformação inicial a qual é retirada instantaneamente, ficando a estrutura a vibrar em regime livre. Este tipo de ensaios é particularmente adequado na avaliação dos coeficientes de amortecimento. Foram realizados ensaios deste tipo, por exemplo, no âmbito dos ensaios de recepção da Ponte Internacional do Guadiana ou da estrutura de ampliação da pista do Aeroporto Internacional da Madeira, em que foi utilizada uma massa de 600 kN suspensa do tabuleiro através de cabos de pré-esforço (Figura 13) ou ainda da ponte Vasco da Gama (Cunha *et al*, 1998).



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Ponte Internacional do Guadiana (1991)



Aeroporto Internacional da Madeira (2000)

Figura 13 - Ensaios de vibração em regime livre

Os ensaios de vibração ambiente exploram o facto das estruturas estarem regularmente sujeitas a um conjunto de acções tais como o vento ou o tráfego, denominadas acções ambiente, que constituem uma excitação dinâmica natural da estrutura. Os ensaios dinâmicos realizados actualmente são maioritariamente deste tipo, graças à qualidade dos resultados que proporcionam e à facilidade de execução, uma vez que não é necessária a mobilização de meios pesados nem a imposição de restrições ao tráfego. Como as amplitudes de resposta da estrutura podem ser relativamente baixas, é necessário usar equipamentos com elevada sensibilidade.

A realização dos ensaios dinâmicos estende-se à caracterização global do estado das estruturas, uma vez que as propriedades dinâmicas estão directamente relacionadas com esse estado (Rodrigues, 2005).

Conclusões

Um sistema integrado de monitoramento estrutural e de durabilidade visa garantir a segurança e a durabilidade da estrutura e contribuir para a optimização da sua gestão ao longo da vida útil.

Para esse efeito, o sistema deve ser objeto de um planeamento adequado, que compreende uma clara definição dos objetivos a atingir, uma análise da estrutura que permita a escolha das grandezas a medir, da localização dos pontos de medição, da periodicidade das medições, dos equipamentos de medição e de aquisição implementados.

As técnicas apresentadas podem ser utilizadas em pontes só após a deteção de anomalias de funcionamento, sendo um precioso auxiliar no esclarecimento de dúvidas existentes, mas existem claras vantagens se o monitoramento preceder a ocorrência dessas anomalias, isto é



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



se tiver início durante a construção ou no início da entrada em serviço da obra. Desta forma será possível a detecção precoce das anomalias, sendo a informação entretanto recolhida da maior utilidade na caracterização do problema e, conseqüentemente, na adoção das necessárias medidas preventivas ou corretivas.

Perpetiva-se que a evolução dos sistemas de monitoramento passe pela progressiva automatização de todo o processo de medição, transmissão, processamento e arquivo da informação em bases de dados, com disponibilização dos diversos elementos via web. Será inevitável a integração dos sistemas de monitoramento nos sistemas de gestão de obras de arte progressivamente adotados pelos diversos donos de parques de pontes, facilitando o envolvimento de todos os interessados, incrementando a eficiência das operações de conservação, prevenindo acidentes e, desta forma, obter o máximo retorno do investimento efetuado na sua instalação e manutenção.

Referências

- CUNHA, A., CAETANO, E., CALÇADA, R., & DELGADO, R. (1998). Ensaio dinâmico da ponte Vasco da Gama. *Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, (pp. 547-556). Lisboa.
- CURY, A. *Techniques d'anormalité appliquées à la surveillance de santé structurale*, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, 2010.
- ECEX – Ponte Presidente Costa e Silva. Monografia, Empresa de Construção e Exploração da Ponte Presidente Costa e Silva, Rio de Janeiro, 1975.
- FÉLIX, C. Monitorização e análise do comportamento de obras de arte, Tese de doutoramento, 2004.
- GLISIC, B.; INAUDI, D. *Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons Lda, 2007.
- LI, H.; OU, J. Structural Health Monitoring: From Sensing Technology Stepping to Health Diagnosis, *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, 1877–7058, 2011. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.095.
- INAUDI, D. *Integrated Structural Health Monitoring Systems for Bridges*, ASCP'09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes, Lisboa, 2009.
- MARECOS, J. *Arrábida Bridge. Observation of the structure*, Monograph, 1963, LNEC.
- MARECOS, J.; CASTANHETA, M.; TRIGO, J. T. – “Field Observation of Tagus River Suspension Bridge”, *J. Struct. Division, ASCE*, Vol. 95, No ST4, April 1969, pp 555-583.
- MARECOS, J.; CASTANHETA, M.; ROSA, C. *Observação da Ponte Rio-Niterói. Resultados das observações efectuadas num troço de concreto protendido com 480 m de extensão*. Relatório LNEC, 1975.
- PEREIRA, E.; SALTA, M. “Monitorização permanente da durabilidade de estruturas de betão armado. Métodos existentes e suas limitações”, *JPEE 2006*, LNEC, pp.260-261, 2006.
- PRADA, M.; TOIVOLA, J.; KULLAA, J.; HOLLMÉN, J. “Three-way analysis of structural health monitoring data”, *Neurocomputing 80(2012)119-128*, doi:10.1016/j.neucom.2011.07.030, Elsevier B.V., 2012.
- ROCHA, M.; BORGES, J. Ferry; MARECOS, J. “Observation of some reinforced concrete structures”, *Symposium on Observation of Structures*, RILEM, Lisbon, pp 729-753, 1955.
- RODRIGUES, J.. *Identificação Modal Estocástica. Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*. Lisboa: TPI 35, LNEC, 2005.
- RYALL, M. J. *Bridge Management*. Elsevier, 2010.
- SANTOS, J., CRÉMONA, C., ORCESI A. D., SILVEIRA, P., *Multivariate Statistical Analysis for Early Damage Detection*. *Engineering Structures*; 56: 273-285; 2013. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.05.022.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

- SANTOS, J., ORCESI, A. D., CRÉMONA, C., SILVEIRA, P., Baseline-free real-time assessment of structural changes. *Structure and Infrastructure Engineering Maintenance, Management, Life-Cycle Design & Performance*. 2014: 1-17. DOI:10.1080/15732479.2013.858169.
- SANTOS, L. O. Observação e análise do comportamento diferido de pontes de betão, Dissertação de doutoramento, IST, 2001
- SANTOS, L. O.; SANTOS, T.; Xu, M.; SANTOS, J. P.; SILVEIRA, P. “Monitorização do Comportamento Estrutural de Pontes Estaiadas”, V Congresso Brasileiro de Estruturas e Pontes, Rio de Janeiro, 2012.