

GESTÃO DE INFRAESTRUTURAS

ENSAIOS DE CARGA DE PONTES

Luís Oliveira Santos
Investigador principal, LNEC
luis.osantos@lnec.pt

INTRODUÇÃO

A realização de ensaios 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. Em Portugal existe uma longa tradição na realização de ensaios de carga de pontes, designadamente, no final da construção. Com efeito, o LNEC realizou pela primeira vez em 1952 o ensaio de carga de uma ponte, concretamente uma ponte em arco sobre o rio Sousa (Figura 1). Numa perspetiva histórica, merecem uma referência particular os estudos efetuados na ponte da Arrábida (Marecos, 1963) e na ponte suspensa sobre o rio Tejo, atualmente designada Ponte 25 de Abril (Marecos *et al.*, 1969). Ao longo destes

anos o LNEC realizou centenas de ensaios de carga de pontes, numa primeira fase de forma exclusiva, tendo-se assistido nos últimos anos a um interesse crescente da parte de diversas entidades. Este facto está naturalmente associado ao incremento de atividade neste domínio, resultante do significativo aumento de construção de novas pontes nas últimas duas décadas, e embora de forma mais moderada também de reabilitação de pontes existentes, bem como de um interesse crescente, por parte de donos de obra e projetistas, pela verificação experimental do comportamento estrutural de pontes, não só recorrendo a ensaios de carga mas também à observação do comportamento em serviço. Pretende-se neste trabalho enquadrar os diversos tipos de ensaios de carga de pontes indicando as principais vantagens e limitações associadas.

ENSAIOS DE CARGA ESTÁTICOS

Os ensaios de carga estáticos consistem na aplicação à estrutura de uma sucessão de carregamentos, através do posicionamento estratégico de cargas de forma a maximizar esforços ou deslocamentos em secções críticas da estrutura, e na medição da correspondente resposta dessa estrutura, através de equipamento previamente instalado.

Os ensaios de carga estáticos podem ser divididos em três tipos de acordo com os objetivos 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*).

Os ensaios à rotura são possíveis 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 de cargas de forma incremental com o objetivo 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 está associada a um risco elevado de provocar danos, ou mesmo o colapso da estrutura, sendo necessário proceder a uma instrumentação detalhada, bem como uma análise cuidada da resposta da estrutura a cada incremento de carga, de forma a despistar indícios de um

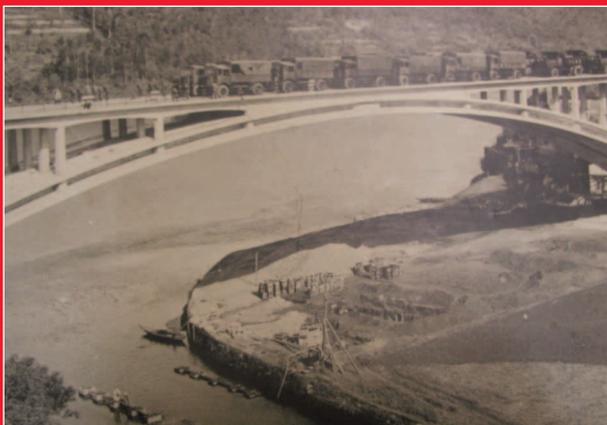


Figura 1: Ensaio de carga da ponte sobre o rio Sousa.



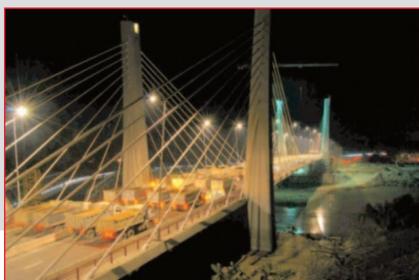
> 2



> 3



> 4



> 5



> 6

comportamento não linear ou anômalo. 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 efetivas. Contudo, devido ao risco associado, o recurso a estes testes deve ser restrito aos casos em que não foi 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 provocar danos na 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 respetivo modelo numérico. Associadas a

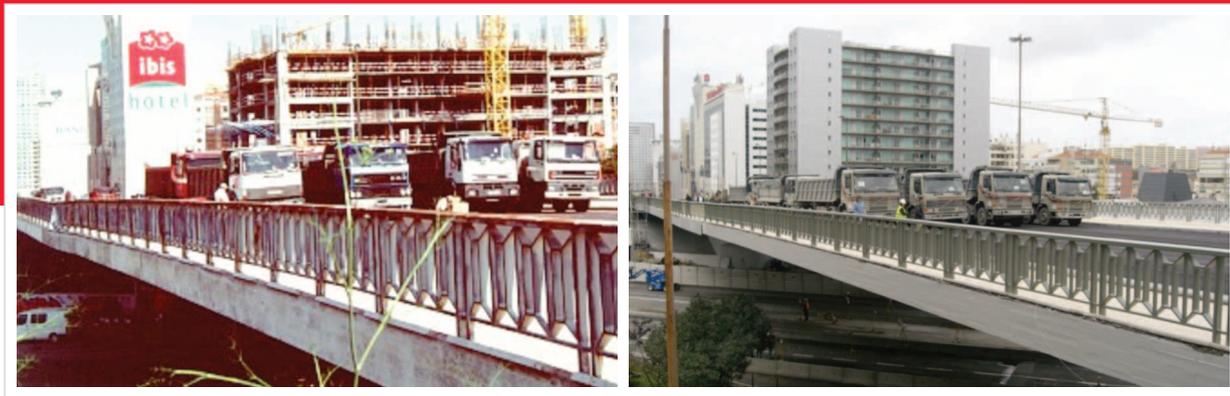
estes ensaios são frequentemente realizados ensaios pseudo-estáticos, em que um veículo ou uma linha de veículos, com peso conhecido, se move muito lentamente ao longo da ponte, permitindo a determinação de linhas de influência experimentais.

Pelas razões expostas, a generalidade dos ensaios realizados, tanto a nível nacional como europeu, são do tipo diagnóstico. Com efeito, é comum a realização de ensaios de receção no final da construção das pontes de maior dimensão, bem como de algumas obras correntes, neste caso escolhidas por amostragem. No primeiro caso são inúmeros os exemplos, referindo-se os ensaios das pontes atirantadas do Guadiana e do Arade [Fernandes, Cardoso, Garrett, & Costa, 1993] e Salgueiro Maia [Santos, Xu, & Fernandes, 2002], a ponte sobre o rio Corgo [Santos, Rodrigues, & Xu, 2004], o Viaduto de Vila Pouca de Aguiar [Santos & Xu, 2007] ou, mais recentemente, a ponte ferroviária sobre o rio Sado na variante de Alcácer. Esta prática tem-se alargado nos últimos anos aos PALOP, onde

o LNEC realizou, em 2009, o ensaio da Ponte Europa-África sobre o rio Cacheu (Figura 4), na Guiné-Bissau, e, em parceria com o Laboratório de Engenharia de Angola, da Ponte 4 de abril sobre Catumbela [Santos, Xu, Silveira, & D'abril, 2010] (Figura 5), e da ponte sobre o rio Kwanza (Figura 6), ambas em Angola. No caso das obras de arte correntes, normalmente integradas em autoestradas concessionadas, é usual a escolha em cada lanço de algumas obras tipo de menor dimensão.

A realização destes ensaios permite a verificação das teorias de comportamento consideradas na elaboração do projeto, a deteção precoce de eventuais deficiências estruturais e a obtenção de estados de referência, especialmente interessantes perante a ocorrência de problemas ao longo da sua vida útil, para além de permitir atestar perante o dono de obra a aptidão da ponte para entrar em serviço. Outra situação em que a realização de ensaios deste tipo se revela de grande utilidade é no âmbito da avaliação da segurança de pontes existentes. Embora sem dar uma indicação

- > Figura 2: Ensaio da ponte Salgueiro Maia.
- > Figura 3: Ensaio de carga da ponte sobre o rio Corgo.
- > Figura 4: Ensaio da ponte sobre o rio Cacheu (Guiné-Bissau).
- > Figura 5: Ensaio da ponte sobre o rio Catumbela (Angola).
- > Figura 6: Ensaio da ponte sobre o rio Kwanza (Angola).



> 7

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 projeto de reabilitação, bem como na verificação da eficácia da reabilitação efetuada. Exemplos de obra nestas circunstâncias, ensaiadas antes e após a sua reabilitação, são o Viaduto da rua Ramalho Ortigão, em Lisboa (Figura 7) ou a Ponte do Pinhão (Costa, Dimande, Félix, & Figueiras, 2007).

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 aspetos 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 aspetos, 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.

Ao contrário do que sucede em diversos países europeus, como o Reino Unido (ICE, 1998), França (SETRA, 2004) ou Espanha (Dirección General de Carreteras, 1999), em Portugal não existe nenhum documento normativo ou

orientador que estabeleça os procedimentos a adotar em ensaios de carga. Na prática usual, os carregamentos são limitados pela indução de esforços máximos de cerca de 70% dos esforços característicos provocados pelas sobrecargas regulamentares. 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.

A realização destes ensaios carece de uma preparação cuidada, compreendendo a implementação de um modelo numérico, que permita o dimensionamento das cargas de ensaio, a definição dos casos de carga e a estimativa da resposta estrutural, essencial na definição dos pontos e grandezas a medir, bem como na escolha do equipamento mais adequado.



> 8

> Figura 7: Ensaio de carga do Viaduto da rua Ramalho Ortigão, em Lisboa, antes e após a sua reabilitação.

> Figura 8: Sistemas de medição de deslocamentos verticais.

Embora variando com as características das pontes, as grandezas a medir compreendem preferencialmente deslocamentos verticais, rotações e extensões. Outras grandezas relevantes são as forças dos tirantes ou as reações de apoio. O desenvolvimento tecnológico tem disponibilizado um conjunto variado de sensores para medição das diversas grandezas, com diferentes princípios de funcionamento, permitindo uma escolha adequada face aos requisitos necessários. A título ilustrativo, apresentam-se na Figura 8 três processos de medição de deslocamentos verticais.

ENSAIOS DINÂMICOS

A realização de ensaios dinâmicos permite a determinação experimental das características dinâmicas de uma estrutura, designadamente, as frequências e configurações dos

principais modos de vibração, bem como os 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 de 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 receção da Ponte Internacional do Guadiana, 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 9) ou ainda da ponte Vasco da Gama (Cunha, Caetano, Calçada, & Delgado, 1998). Na Figura 10 apresenta-se o registo das vibrações medidas na secção de meio vão da ponte do Guadiana na sequência da libertação da massa.

Os ensaios de vibração ambiente tiram partido do facto das estruturas estarem regularmente sujeitas a um conjunto de ações tais como o vento ou o tráfego, denominadas ações ambiente, que constituem uma excitação dinâmica natural da estrutura. Os ensaios dinâmicos realizados atualmente são maioritariamente de 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 diretamente relacionadas com esse estado (Rodrigues, 2005).



Figura 9: Ensaios de vibração em regime livre na Ponte Internacional do Guadiana e no Aeroporto da Madeira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização de ensaios de carga de uma obra de arte possibilita um conhecimento mais realista do seu comportamento estrutural, a avaliação das condições de segurança, a averiguação da conformidade da estrutura face aos pressupostos do projeto, a identificação dos parâmetros dinâmicos globais mais relevantes, a aferição dos modelos numéricos que descrevem o comportamento estrutural e o estabelecimento de estados de referência. Para o sucesso de um ensaio de carga é necessária uma clara definição dos objetivos, uma adequada preparação e uma execução cuidada, que inclua uma análise crítica dos resultados no decurso dos próprios ensaios. ■

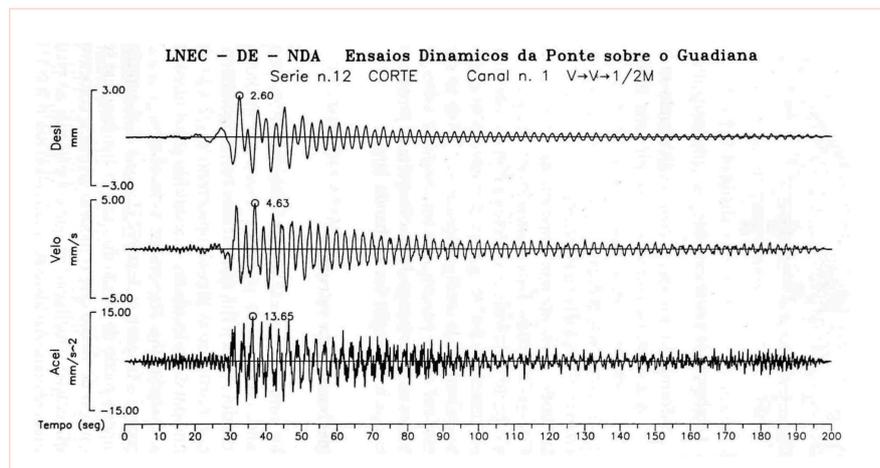


Figura 10: Registo de vibrações na secção de meio vão da ponte do Guadiana após libertação da massa (Branco, Azevedo, Corrêa, & Costa, 1993).

REFERÊNCIAS

- Branco, F., Azevedo, J., Corrêa, M. R., & Costa, A. C. (1993). Estudo do comportamento dinâmico da ponte do Guadiana em Vila Real de Santo António. *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade* (pp. 241-255). Lisboa: LNEC.
- Costa, B., Dimande, A., Félix, C., & Figueiras, J. (2007). Análise do Comportamento da Ponte do Pinhão durante e após as Provas de Carga realizadas para apoio ao Projeto de Reabilitação e Reforço. *Congresso de Construção Metálica e Mista*. Porto: cmm.
- Cunha, A., Caetano, E., Calçada, R., & Delgado, R. (1998). Ensaios dinâmicos da ponte Vasco da Gama. *Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, (pp. 547-556). Lisboa.
- Direccion General de Carreteras. (1999). *Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- Fernandes, J. A., Cardoso, E. T., Garrett, J. A., & Costa, A. C. (1993). Ensaios de carga das pontes do Guadiana e do Arade. *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade* (pp. 209-214). Lisboa: LNEC.
- ICE. (1998). *Supplementary Load Testing of Bridges*. London: The Institution of Civil Engineers, Thomas Telford.
- Marecos, J. (1963). *Arrábida Bridge*. Observation of the structure. Lisboa: LNEC.
- Marecos, J., Castanheta, M., & Trigo, J. T. (1969). Field Observation of Tagus River Suspension Bridge. *Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 95, No ST4*, pp. 555-583.
- Rodrigues, J. (2005). *Identificação Modal Estocástica. Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*. Lisboa: TPI 35, LNEC.
- Ryall, M. J. (2010). *Bridge Management*. Elsevier.
- Santos, L. O., & Xu, M. (2007). Ensaios de Carga do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar. *ICM 2007 - A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil*. Lisboa: LNEC.
- Santos, L. O., Rodrigues, J., & Xu, M. (2004). Ensaios estáticos e dinâmicos da ponte sobre o rio Corgo. *Betão Estrutural 2004*. Porto: FEUP.
- Santos, L. O., Xu, M., & Fernandes, J. A. (2002). Ensaios de Carga da Ponte Salgueiro Maia. *Betão Estrutural 2002*. Lisboa: LNEC.
- Santos, L. O., Xu, M., Silveira, P., & D'abril, M. M. (2010). Observação e ensaio da Ponte 4 de abril sobre o rio Catumbela em Angola. *Betão Estrutural 2010*. Lisboa.
- SETRA. (2004). *Guide des épreuves d'ouvrages d'art*. Paris: SETRA.