

A observação do comportamento estrutural de pontes. Desenvolvimento actual e perspectivas futuras

João Almeida Fernandes

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa

RESUMO

Descrevem-se neste trabalho as técnicas e equipamentos utilizados *in situ* pelo LNEC, no âmbito da observação de estruturas de pontes, edifícios e outras construções especiais como silos, docas ou instalações industriais. Tecem-se algumas considerações sobre metodologias para o estudo experimental do comportamento estrutural, incluindo as provas de carga realizadas, mais frequentemente, no final da construção.

PALAVRAS-CHAVE

Monitorização, estruturas, pontes, estudo experimental, ensaios de carga.

1. Introdução

A observação do comportamento de pontes e outras estruturas, nomeadamente edifícios, estruturas industriais, baterias de silos, docas de construção e reparação naval ou monumentos, tem sido uma actividade intensamente prosseguida pelo Departamento de Estruturas do LNEC, ao longo de mais de sessenta anos [1] e [2]. Tal levou à criação em 1961 da Divisão de Observação de Obras, actualmente denominada Núcleo de Observação de Estruturas.

A observação do comportamento de estruturas de grande importância e complexidade processa-se em geral a partir do início da sua construção, desde logo pela necessidade de se colocarem equipamentos de medida no seu interior. Tal implica um conhecimento adequado de cada processo construtivo, e a subordinação ao ritmo imposto pelas actividades da construção. Nessa fase da vida de uma estrutura, as actividades de observação acompanham as tarefas do controlo de qualidade de produção, da responsabilidade do construtor, bem como as actividades de fiscalização da responsabilidade do dono da obra ou de uma empresa fiscalizadora por ele contratada. Embora possa existir uma maior ou menor interacção entre as actividades de instrumentação e as do controlo de produção e de fiscalização, as actividades de instrumentação realizadas pelo LNEC são normalmente paralelas ao desenvolvimento do próprio sistema construtivo e visam em especial o controlo da segurança estrutural no final da construção, pela realização de provas de carga estáticas e dinâmicas. Em estruturas de maior dimensão e/ou complexidade, as actividades de observação e análise do comportamento estrutural prosseguem na fase de serviço, por forma a assegurar a manutenção da segurança e da qualidade estrutural exigidas para a obra em causa [3].

Sem prejuízo destes dois objectivos, nem perda da independência necessária à manutenção da capacidade de julgar das reais condições de segurança da estrutura em observação, são por vezes realizadas medições com outros fins, designadamente quando solicitadas pelo dono da obra, pelo projectista ou pelo próprio empreiteiro. Estas acções complementares, fruto de um permanente diálogo da equipa de observação do LNEC com as restantes entidades envolvidas, permitem não só disponibilizar em tempo útil resultados experimentais do maior interesse colhidos *in situ*, como auxiliam a compreensão das naturais complexidades científicas e técnicas, características de cada empreendimento.

É indiscutível o enorme pioneirismo e relevo internacional das primeiras observações efectuadas pelo LNEC em grandes pontes em Portugal, como é o caso da ponte da Arrábida [4], no rio Douro, e da ponte suspensa sobre o rio Tejo [5], em Lisboa. No entanto, o notável incremento de novos empreendimentos no nosso país, designadamente no quadro da modernização das infra-estruturas de transportes, decorrente da integração de Portugal na União Europeia, fez aumentar enormemente o número e a complexidade das actividades de observação de estruturas em Portugal. Tal bem se expressa no facto de cerca de 60% das observações de estruturas de grandes empreendimentos a cargo do LNEC se terem verificado nos últimos 20 anos, e de que também cerca de 60% dos mais de três centenas de ensaios de pontes e viadutos de médio porte efectuados pelo LNEC terem ocorrido neste mesmo período.

2. Objectivos da observação de estruturas

Entende-se por Observação de Estruturas o conjunto de actividades analíticas (com recurso às mais modernas técnicas de modelação do comportamento) e experimentais (através da adequada monitorização do funcionamento das obras) conduzidas de forma sistemática com vista, não só ao estudo do comportamento real das obras, e sua comparação com o comportamento previsto a partir da sua modelação, mas também à aferição do desempenho das construções ao longo da vida útil, avaliando a sua segurança e funcionalidade.

Assim, podem elencar-se, entre os principais objectivos da Observação de Estruturas, os seguintes:

- a verificação (ou não) das teorias de comportamento;
- a detecção em tempo oportuno de eventuais deficiências estruturais;
- a obtenção de importantes estados de referência para o futuro;
- a quantificação dos valores reais das acções.

3. Técnicas e equipamentos a utilizar *in situ*

3.1. Considerações gerais

As técnicas e os equipamentos de medida utilizados na observação do comportamento das estruturas não são simples adaptações dos utilizados nos ensaios em laboratório. De facto, as difíceis condições de trabalho inerentes às frentes de trabalho de cada estaleiro tornam imperiosa uma escolha cuidada das técnicas a adoptar, dos equipamentos a utilizar e dos processos mais adequados de instalação em obra desses equipamentos [6].

A escolha das técnicas experimentais a adoptar dependerá, em cada caso, das grandezas de controlo a observar, das características geométricas e físicas da obra, do método construtivo utilizado e do seu próprio ritmo de desenvolvimento. Em face dos meios

disponíveis de acesso aos locais a instrumentar, das condições de trabalho existentes nesses locais e da duração do intervalo de tempo em que os aparelhos poderão ser colocados (após colocação de armaduras e antes da betonagem da secção a instrumentar, por exemplo) haverá que adaptar a experiência obtida em casos análogos, por forma a levar com sucesso as tarefas de observação.

Os equipamentos de medição terão que apresentar a robustez necessária à sua utilização em obra (resistir sem danos às acções mecânicas decorrentes do lançamento e posterior vibração do betão da secção a instrumentar, por exemplo), ser fáceis de transportar e estáveis no seu funcionamento, quer durante a colocação, quer ao longo da vida da estrutura.

As técnicas e equipamentos utilizados *in situ* devem ainda apresentar um elevado grau de redundância, de modo a garantirem, com razoável confiança, a qualidade dos resultados dessas medições. Em geral utilizam-se simultaneamente, no mesmo plano de observação, técnicas e equipamentos de diferente grau de sofisticação, combinando-os de forma a melhor tirar partido das vantagens relativas de cada um. Estas técnicas e equipamentos podem-se dividir em três níveis distintos:

- os aparelhos mecânicos, normalmente amovíveis, operando sobre bases de referência fixas na estrutura, em geral de elevada sensibilidade e precisão, mas de grande lentidão na operação e exigindo grande intervenção do operador;
- os aparelhos eléctricos, centralizados em estações de comutação, por vezes instalados em locais de difícil acesso, com velocidade de operação mais rápida mas exigindo ainda a presença do operador;
- os aparelhos automáticos, ligados às centrais de observação, com possibilidade de efectuar as medições praticamente em simultâneo, com registo contínuo ou periódico, com tratamento informático dos resultados e com capacidade de comunicação à distância com um centro de estudos (por exemplo, com ligação através de modem à internet).

Quanto às grandezas de controlo a eleger, características de cada obra, é também possível de uma forma genérica estabelecer uma hierarquia de importância relativa, no que respeita ao grau de fiabilidade da medição. Podem assim distinguir-se entre grandezas directas - as efectivamente medidas *in situ*, como, por exemplo, forças, deslocamentos, rotações, deformações e temperaturas, e grandezas indirectas, deduzidas a partir das anteriores, como tensões e esforços. Entre as grandezas directas, também a sua importância não é indiferente: enquanto que a medição de uma força apresenta em geral uma informação de carácter mais global, um deslocamento carece normalmente de informação complementar para a sua interpretação. Uma rotação, derivada de uma deformada, produz uma informação ainda mais restrita e a medição de uma extensão tem um carácter marcadamente pontual. Por consequência, e de uma forma genérica, o número de pontos a medir, em relação a cada grandeza, é em geral inversamente proporcional ao seu grau de globalidade.

Após estas considerações preliminares, procura-se em seguida referir algumas das técnicas mais utilizadas na observação do comportamento estrutural de pontes.

3.2. Medição de deslocamentos lineares e angulares

A medição dos deslocamentos lineares de uma estrutura, quer durante a realização do processo construtivo, quer durante a realização das provas de carga, quer já na fase de serviço, representam uma informação experimental de primeira importância para o efectivo controlo da sua segurança e operacionalidade. Estes deslocamentos lineares, verticais ou

horizontais, são normalmente determinados por meios ópticos relativamente a marcas de referência materializadas para o efeito em zonas, consideradas fixas, próximas da obra.

Para além destes deslocamentos, importa igualmente medir os deslocamentos relativos nas juntas que separam a estrutura do exterior, observação que se inicia no final da construção e que continua durante a vida da obra, aferindo então a deformação total da estrutura devida às variações térmicas diárias e anuais e às parcelas remanescentes da fluência e retracção do betão. Estas variações da abertura das juntas de dilatação podem ser medidas a partir da instalação de aparelhos eléctricos, por exemplo, do tipo magnetostriectivo (Figura 1).



Figura 1 – Medição da abertura de uma junta com um deflectómetro magnetostriectivo

Em estruturas com um marcado desenvolvimento geométrico numa determinada direcção, como é o caso do tabuleiro das pontes, é da maior importância a medição de deslocamentos verticais relativos, normalmente recorrendo à medição automática através de um sistema de níveis líquidos. Utilizando sensores de pressão de muito elevada precisão (Figura 2), podem medir-se deslocamentos verticais do tabuleiro com precisão submilimétrica.

A medição de rotações desde o início da construção, é também de grande importância. É, normalmente efectuada através de clinómetros eléctricos de grande precisão, e fornece uma informação do maior interesse, nomeadamente sobre a manutenção da verticalidade dos pilares e de outros elementos verticais (Figura 3).

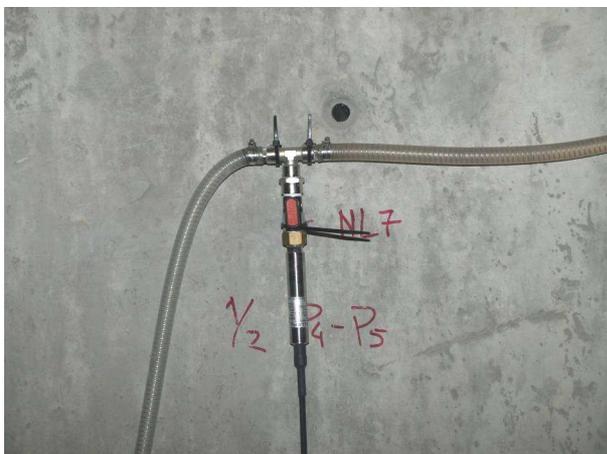


Figura 2 – Medição de deslocamentos verticais através de um sistema de níveis líquidos



Figura 3 – Clinómetros eléctricos

3.3. Medição da temperatura no interior do betão e em tirantes

Por forma a poder caracterizar adequadamente a evolução das ondas térmicas no interior das peças estruturais são normalmente instalados termómetros eléctricos de resistência, dispostos segundo a espessura dos diversos elementos que constituem as secções consideradas mais representativas [7]. Estas medições são de importância fundamental para a condução do processo construtivo.

No que respeita à medição das temperaturas em tirantes, deve-se evitar a colocação de termómetros no interior da sua protecção anti-corrosão, para não prejudicar essa mesma protecção. De facto, pode-se considerar a eventual perda de durabilidade dos tirantes como o aspecto mais sensível e vulnerável deste tipo de elementos estruturais. Por esta razão, é preferível proceder à instrumentação de troços de tirantes colocados nas mesmas condições de exposição ambiental, e estimar, com base nas suas variações de temperatura, as variações dos tirantes reais [8].

3.4. Medição de extensões nas secções de betão

A observação da evolução no tempo das deformações no interior das peças estruturais em betão simples, armado ou armado pré-esforçado, é realizado há mais de sessenta anos recorrendo a extensómetros de corda vibrante (Figura 4). Continuam a ser estes extensómetros aqueles que mais longevidade têm apresentado, razão pela qual se continua a preconizar o seu emprego. O seu principal inconveniente resulta da relativa lentidão do processamento de recolha das medições, facto que os torna inoperativos para uma resposta dinâmica. Por esse facto, a instrumentação deve ser complementada com extensómetros eléctricos, de resistência por exemplo.



Figura 4 – Extensómetro de corda vibrante

Os extensómetros instalados no interior das peças estruturais são habitualmente designados por extensómetros activos, por oposição aos aparelhos idênticos instalados em prismas compensadores dos efeitos diferidos, dispostos junto à secção instrumentada.

3.5. Medição das forças em tirantes

A medição das forças em tirantes é facilmente executada durante a construção, quer através dos macacos hidráulicos utilizados durante o ajustamento, quer através da instrumentação de cordões dos tirantes, por meio de extensómetros eléctricos de resistência e segundo o denominado processo de isotensão. No final da construção, ambas as extremidades dos tirantes, junto às placas de amarração, são seladas de forma

a assegurar a sua protecção à corrosão, não sendo mantidos, por razões de durabilidade, os referidos extensómetros eléctricos de resistência. Por este facto, a partir dessa data a medição periódica das forças nos tirantes poderá realizar-se através da disposição de um anel dinamométrico junto à cabeça de amarração (Figura 5) ou através do método da vibração pela identificação da frequência própria do tirante (Figura 6) [9].



Figura 5 – Anel dinamométrico na medição da força instalada num tirante

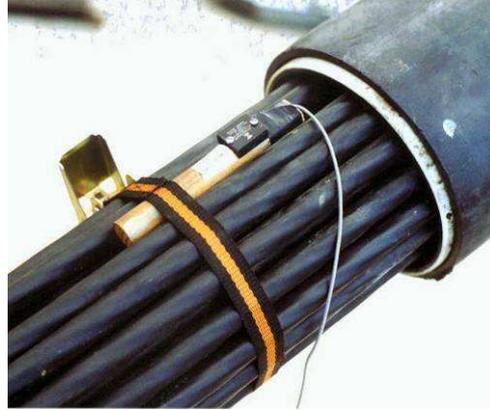


Figura 6 – Acelerómetro para a medição da força num tirante através do método da vibração

No entanto, ambos os métodos referidos apresentam as suas dificuldades. Com efeito, a disposição dos anéis dinamométricos, para além do elevado custo, exige uma maior complexidade do dispositivo da amarração. Por outro lado, a vibração dos tirantes, permanentemente excitados pelas vibrações da própria estrutura, e até pelas próprias brisas ambientais, interactivam por vezes entre si ao transmitirem essas vibrações à estrutura. Por consequência pode por vezes ser difícil identificar os seus principais modos de vibração. Acresce ainda que, pelo método da vibração pela identificação da frequência própria do tirante, existe sempre uma incógnita que resulta da influência do encastramento elástico dos tirantes nas suas amarrações. Tal se traduz numa margem de erro de cerca de 5 a 10 % do valor do esforço axial do tirante. No entanto, se no final da construção este método for utilizado em simultâneo com um dos dois acima referidos, é possível determinar o valor exacto, para cada cabo, dessa constante.

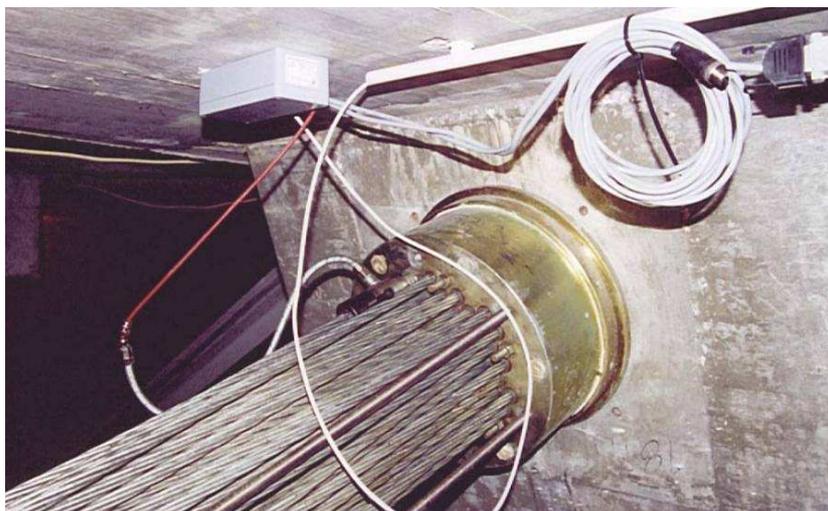


Figura 7 – Utilização de células de carga na medição da força instalada num tirante

Por esse facto, quando é utilizado o processo de isotensão, e desde que se usem desde o início células de carga equipadas com extensómetros eléctricos de resistência que não comprometam a durabilidade do tirante, a instrumentação entre a placa e o bloco de ancoragem de alguns desses cordões permite aliar uma boa fiabilidade na medição e com um custo muito menor relativamente à utilização do anel dinamométrico (Figura 7).

3.6. Determinação *in situ* da retracção e fluência do betão

A determinação *in situ* do modo de evolução dos efeitos diferidos do betão é de primordial importância, quer para a condução do processo construtivo, quer para a adequada previsão da evolução dos estados de deformação e de tensão na superestrutura após a entrada em serviço e até que terminem os fenómenos de fluência e de retracção do betão.

É ainda hoje muito difícil a previsão do modo de evolução destes fenómenos, quer quanto à velocidade do seu processamento, quer quanto aos seus valores finais, mesmo em salas de ensaio, com ambientes condicionados de temperatura e humidade. Porém, estas dificuldades crescem enormemente quando se trata de prever o modo de desenvolvimento destes efeitos diferidos nas estruturas reais, pois às variações diárias de temperatura e humidade relativa ambientais, juntam-se muitas outras acções, tais como a radiação solar, a circulação do ar, a acção da chuva, a emissividade nocturna, etc.

Como consequência deste facto, poderia parecer à partida constituir uma missão impossível retirar qualquer informação útil através do acompanhamento no tempo dos estados de deformação no interior das peças de betão, através da sua instrumentação com os designados extensómetros activos. Estes apenas forneceriam assim indicações de carácter instantâneo, medindo deformações sob a actuação de cargas a que correspondem imediatamente variações da tensão elástica do betão, facilmente estimadas pelo conhecimento da evolução no tempo do respectivo módulo de elasticidade.

No entanto, se através de técnicas e equipamentos adequados, forem instrumentados junto à secção a observar provetes de betão sem qualquer carregamento, mas que estejam sujeitos tanto quanto possível às mesmas acções ambientais, então poder-se-á avaliar os efeitos diferidos no tempo respeitantes à retracção desse betão (Figura 8).

De igual modo, se se repetir o mesmo tipo de comportamento, mas agora introduzindo uma determinada lei de carregamento em outros provetes de betão semelhantes, estar-se-á então também em condições de estimar a evolução dos efeitos diferidos devido à fluência do betão.

O problema surge porém, quanto à forma dos provetes a adoptar e, principalmente, do modo mais adequado da sua disposição junto às secções do elemento estrutural a instrumentar. Parece poder-se considerar relativamente óbvio que a compensação ideal só se obteria com a utilização de uma estrutura inteiramente análoga, mas sem qualquer carregamento, no que respeita à retracção, a que se juntaria uma segunda estrutura com lei de carregamento perfeitamente determinada, para em conjunto se estimar então, por diferença, o efeito da fluência. Porém, o custo de tais técnicas ultrapassaria largamente os benefícios esperados com esse estudo.

No entanto, em obras de grande dimensão e complexidade estrutural, julga-se ser perfeitamente justificada a execução das denominadas aduelas compensadoras, as quais, reproduzindo as mesmas dimensões do tabuleiro real, e dispostas em locais análogos no que respeita às acções ambientais, poderão realizar o mesmo desempenho das tais estruturas semelhantes acima referidas.

Com o recurso a um elevador o número de provetes compensadores, executados em simultâneo num igualmente elevado número de pontes de betão já instrumentadas pelo LNEC, foi já possível estabelecer uma adequada correlação entre a informação obtida com os provetes compensadores e os efeitos diferidos existentes na respectiva secção instrumentada [10], [11] e [12].

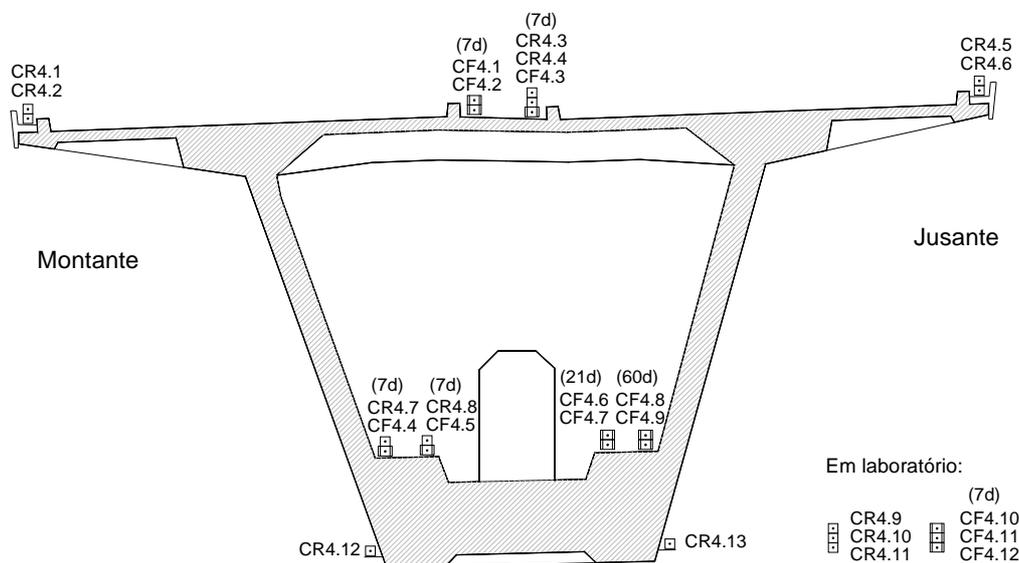


Figura 8 – Compensadores de fluência e termo-higrométricos (Pte. Miguel Torga) [13]

3.7. Observação dinâmica

A observação dinâmica das estruturas tem maiores exigências no que se refere à capacidade dos equipamentos de leitura e processamento da vultuosa informação obtida, resultante de frequências de amostragem que necessariamente têm que ser elevadas. O objectivo principal destas medições consiste normalmente na obtenção experimental das configurações e frequências dos principais modos naturais de vibração das estruturas e respectivos amortecimentos e sua confrontação com os valores numéricos obtidos nos estudos dinâmicos elaborados na fase de projecto. Procura-se ainda obter dados experimentais relativos aos coeficientes de amplificação dinâmica associados a acções como por exemplo a passagem do tráfego.

Para a obtenção dos dados necessários para a identificação das características dinâmicas das estruturas, podem ser utilizados diversos tipos de ensaios, designadamente:

- de vibração forçada com equipamentos de excitação adequados;
- de vibração em regime livre após a libertação repentina de uma deformação inicial imposta através de, por exemplo, um peso pendurado, técnica esta que tem sido aplicada pelo LNEC em diversas obras (Figura 9);
- de vibração ambiental, que consistem na medição das vibrações induzidas nas estruturas pelas acções a que elas normalmente estão sujeitas, metodologia esta que tem vindo a ser aplicada com sucesso num vasto número de obras e que implica a utilização de equipamentos e métodos de identificação modal apropriados [14].

Tendo em vista, por outro lado, a observação do comportamento sísmico das obras, é conveniente instalar macrossismógrafos com sistemas de segurança por duplicação dos

sistemas de alimentação. Estes aparelhos, que deverão incluir três acelerómetros orientados entre si ortogonalmente, deverão satisfazer gamas de frequência compatíveis com as características dinâmicas da superestrutura e terem a capacidade de registo de vários eventos com a identificação por data e hora. Tal instrumentação, para além do seu interesse do ponto de vista da sismologia, poderá ser particularmente útil para o julgamento da segurança e operacionalidade da ponte instrumentada, após a ocorrência de um eventual sismo de intensidade elevada.



Figura 9 – Ensaios impulsivos no Aeroporto da Madeira: libertação de uma massa

3.8. Observação para a durabilidade

Apesar da capacidade de protecção das armaduras conferida pelo betão envolvente, devido à acção combinada da elevada alcalinidade, que permite a passivação do aço, e do efeito barreira à penetração dos agentes agressores, tem vindo a verificar-se nas últimas décadas uma crescente perda de qualidade das estruturas de betão armado em consequência da corrosão das armaduras.

Por consequência, os planos de observação de estruturas de betão passaram a incluir uma monitorização das principais características de durabilidade, como sejam, por exemplo, a evolução no tempo da resistência à penetração dos cloretos e à carbonatação dos betões, ou do potencial de corrosão das armaduras [15]. De igual modo esses planos passaram a prever o estabelecimento de uma monitorização específica com vista à determinação experimental da agressividade ambiental do local da obra.

3.9. Centralização automática das observações numa perspectiva de médio prazo

O elevado número de equipamentos instalados, durante e após a construção, em locais por vezes pouco acessíveis e a necessidade de realizar praticamente em simultâneo uma parte significativa das medições, obriga a uma judiciosa escolha de quais as grandezas de controlo a centralizar e o estudo da forma de tornar operativa essa mesma centralização.

No que respeita ao sistema informático de aquisição, registo e tratamento dos resultados experimentais centralizados, tem sido desenvolvido pelo LNEC um importante esforço de adaptação dos sistemas automáticos de aquisição e processamento disponíveis no mercado internacional. Atenção particular tem que ser dada à garantia da estabilidade e

operacionalidade deste tipo de equipamentos, a actuar de forma contínua por prolongados intervalos de tempo, da ordem de vários meses, e à garantia da manutenção da sua fiabilidade por um prazo não inferior a 10 anos. Para o efeito é normalmente disposto junto a cada secção instrumentada, um *datalogger* (Figura 10) com capacidade de processamento de informação própria. Ligando os vários *dataloggers* a um computador industrial pode centralizar-se todo o sistema de aquisição. Estabelecendo a comunicação do computador industrial com um determinado centro de estudos através da *Internet*, por exemplo, pode a partir desse centro interrogar-se o sistema de aquisição ou alterar os programas de comando cada *logger*. Pode ainda desenvolver-se um sistema de alertas e de alarmes, o qual, sempre que determinados parâmetros ultrapassem certos valores de referência, transmitirá a mensagem correspondente para o centro de estudos encarregue da segurança da obra [16].

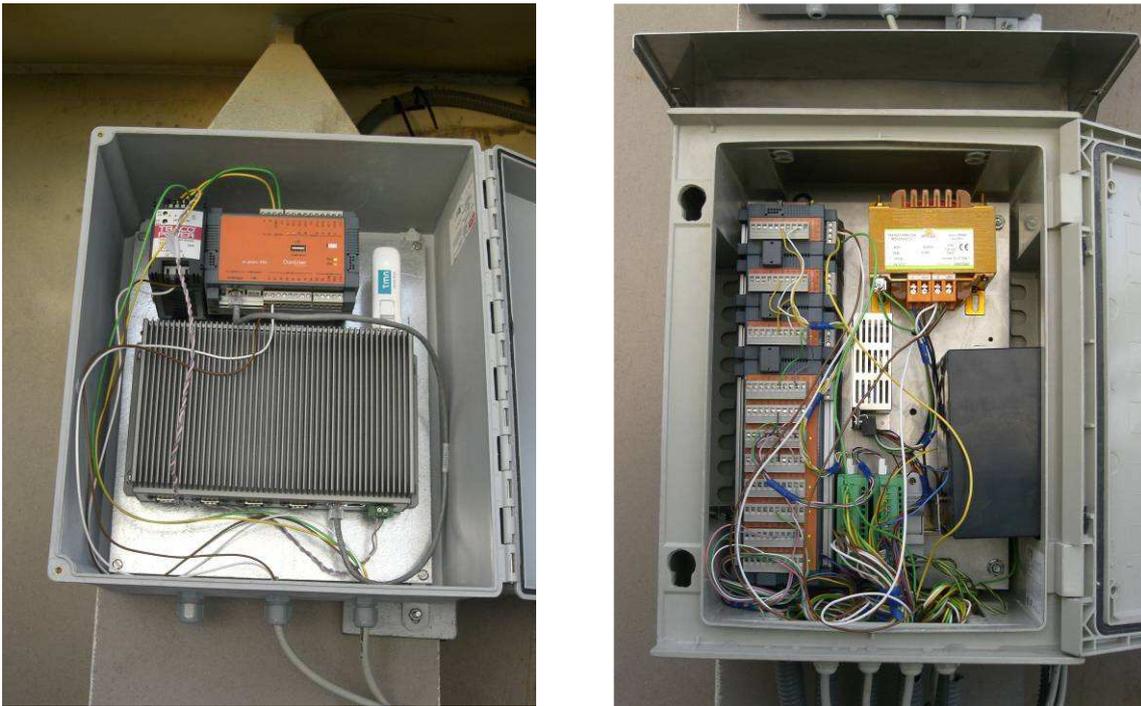


Figura 10 – *Datalogger* instalado em obra (Ponte ferroviária sobre o rio Sado)

4. Planos de observação a médio/longo prazo

Uma actividade de investigação baseada no estudo experimental de uma estrutura de grandes dimensões, de elevada complexidade estrutural, e obedecendo a acelerados ritmos de construção, exige uma preparação e uma planificação muitíssimo cuidada sob pena de se inviabilizarem parcial ou totalmente os objectivos referidos. Por essa razão, e antecedendo suficientemente o início da instrumentação, são várias as tarefas a executar tendo em vista a elaboração do denominado Plano de Observação (Figura 11).

De entre as tarefas referidas destaca-se pela sua importância e prioridade, a elaboração para cada obra da modelação do seu comportamento estrutural. Esta modelação, embora se possa basear em estudos analíticos e experimentais realizados no âmbito da elaboração do projecto estrutural, deve contudo ser suficientemente independente, para poder verificar, ainda que de forma não muito pormenorizada, esse mesmo projecto. Esta modelação é, por outro lado, essencial designadamente quanto:

- ao planeamento das diferentes actividades de observação;
- à escolha das grandezas de controlo a medir;

- à determinação dos pontos a observar, onde se localizarão os equipamentos de medida;
- à previsão dos valores que essas grandezas irão tomar;
- à determinação da sensibilidade e do campo de medida dos equipamentos a adoptar;
- à escolha dos diferentes métodos e técnicas de observação a utilizar, bem como dos próprios equipamentos de medida a instalar;
- e, finalmente, à interpretação, em cada fase ou campanha de observação, dos resultados já obtidos, à compatibilização entre valores medidos e calculados e à formulação das respectivas conclusões.

A importância das conclusões de um estudo experimental deste tipo, realizado *in situ* nas diferentes fases da construção e sob as condições reais em que cada obra se desenvolve, é obviamente de uma importância que nunca é de mais realçar. Da boa compatibilização ou não entre valores medidos e calculados dependerão não só os julgamentos sobre a própria segurança dessa mesma construção, como também uma verificação ou não das teorias de comportamento estrutural tomadas como base dessa modelação. Resulta, por consequência, que a informação obtida directamente da própria obra poderá fornecer indicações da maior utilidade para a própria compreensão dos fenómenos em jogo, criando por vezes dificuldades que permitem, uma vez superadas, corrigir a própria modelação inicial. Isto é, a informação obtida na observação do comportamento estrutural real poderá ser utilizada não só para a melhoria da qualidade estrutural da própria construção em observação, como também traduzir-se num utilíssimo "feed back" informativo, a aplicar no estudo e no projecto de futuras construções similares.

Refira-se, ainda, que esta modelação, bem como o plano de observação a elaborar, deverá considerar as diferentes configurações estruturais, características de cada fase de construção, bem como a configuração estrutural final, que se mantém ao longo da sua vida útil, e com a qual se realizarão as provas de carga.

5. Ensaios de carga no final da construção

A realização de provas de carga, também designadas ensaios de carga, não se verifica apenas no contexto da observação do comportamento estrutural iniciado durante a construção. De facto, é frequente em estruturas de dimensão corrente que não constituam uma obra-tipo (a qual, pela sua eventual repetição em grande escala poderia suscitar um acompanhamento mais cuidado) realizar a instrumentação apenas na fase final da sua construção e antecedendo a entrada em serviço. Estes ensaios, estreitamente ligados aos processos de recepção provisória e definitiva das construções são também referidos como ensaios de recepção.

Os ensaios de recepção não permitem contudo colher o mesmo grau de informação em relação ao obtido pelas provas de carga realizadas no âmbito de uma instrumentação efectuada desde o início da construção. Tal se deve, desde logo, à impossibilidade de colocar equipamentos no interior das secções a observar. Por outro lado, é muito reduzido o conhecimento das principais características dos materiais estruturais aplicados bem como das condições de cura e endurecimento no que respeita aos betões. Igualmente se não dispõem de resultados relativos aos efeitos diferidos do betão e dos aços nem da informação experimental relativa à sensibilidade das diferentes peças estruturais às variações térmicas diárias e sazonais.

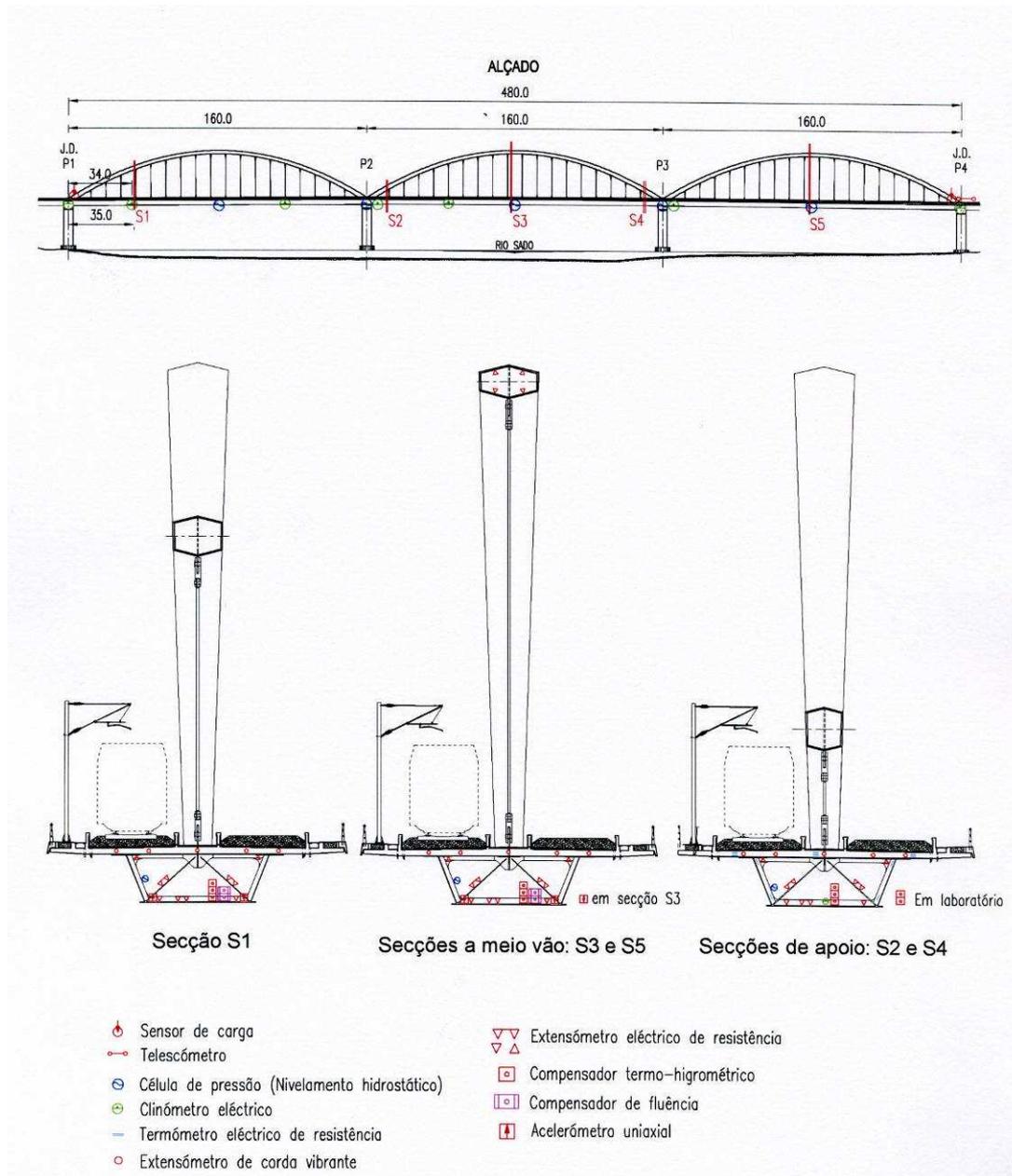


Figura 11 – Plano de observação da ponte ferroviária sobre o rio Sado

Estes ensaios de recepção (Figura 12) desempenham no entanto um papel relevante no contexto da fiscalização e do controlo de qualidade realizadas pela entidade fiscalizadora durante a construção, bem como permitem detectar em tempo oportuno eventuais deficiências nas peças estruturais, nos aparelhos de apoio ou noutros equipamentos complementares. Os ensaios de carga realizam-se normalmente antes das construções entrarem em serviço, não só para se poder obter um julgamento prévio da segurança das obras, mas também para evitar os transtornos e sobrecustos resultantes de uma interrupção da sua laboração ou utilização. Poderá, no entanto, recorrer-se igualmente a provas de carga em estruturas acidentadas ou necessitando de um reforço estrutural.



Figura 12 – Ensaio de recepção em estruturas de vão corrente (A24)

No que respeita, porém, às estruturas instrumentadas durante a construção, os ensaios de carga constituem uma última e importante oportunidade de avaliar, considerando já a estrutura na sua globalidade, a compatibilidade e a coerência entre o modelo e a obra, confirmando mais uma vez, ou não, as teorias do comportamento e os métodos de cálculo; permitem também verificar as condições gerais de segurança antes da entrada em serviço das obras e obter importantes estados de referência necessários à verificação futura da manutenção da qualidade estrutural adquirida durante a construção.

Pela sua importância e complexidade, os ensaios de carga são normalmente objecto de um programa elaborado em separado do plano de observação. Neste programa, além de se definirem o tipo e a localização de equipamentos complementares a montar para o efeito, deverão ser incluídos:

- um rigoroso planeamento das diferentes fases do ensaio;
- a definição do tipo, da disposição e do modo de actuação das cargas de ensaio a utilizar em cada fase (Figura 13);
- a adopção de esquemas de segurança a utilizar em caso de ocorrência de um colapso, parcial ou global, durante os ensaios, tendo em vista a salvaguarda de vidas humanas e de equipamentos colocados em risco na eventual ocorrência desse colapso;
- e, finalmente, mas de não menos importância, os critérios de análise e de interpretação, em cada fase, dos resultados a obter, tendo em vista possibilitar um julgamento permanente da segurança da estrutura e, em caso de dúvida, permitir a imediata interrupção do ensaio.

6. Perspectivas futuras

O forte desenvolvimento verificado na última década, das técnicas e dos equipamentos de medida utilizados na observação do comportamento de pontes e outras estruturas deve-se, em grande parte, à crescente necessidade do seu emprego, sentida pelos principais decisores do vasto campo de actividade da construção e obras públicas. Evoluiu-se, assim, rapidamente, a nível nacional e internacional, para uma situação bem diferente da verificada ao longo das várias décadas anteriores, em que estas actividades de observação estrutural eram normalmente realizadas mais ou menos isoladamente, e apenas pelos Laboratórios de Estado ou por grandes centros de investigação.

De facto, as necessidades impostas por uma sociedade cada vez mais complexa e desenvolvida induzem o surgimento e a rápida evolução de novas exigências colocadas ao bom desempenho das estruturas, acarretando, como consequência, quer uma crescente

variedade e complexidade estrutural, quer o desenvolvimento de novos e mais sofisticados materiais estruturais. No entanto, e em contrapartida, também é cada vez maior o apoio que a observação do comportamento estrutural permite prestar aos diferentes responsáveis pela segurança, economia e funcionalidade, quer das novas construções a realizar, quer das antigas a reabilitar.



Figura 13 – Ensaio de carga da ponte do Arade [17]

Assim, é de prever que a participação das actividades de observação do comportamento de pontes e outras estruturas se continue a revelar cada vez mais importante e, em muitas das situações, mesmo imprescindível, o que inevitavelmente impulsionará de forma acentuada o seu desenvolvimento e crescente complexidade. De entre as perspectivas futuras atrevo-me a salientar os seguintes aspectos:

- Automatização progressiva dos sistemas de aquisição – o crescente aumento do número de parâmetros a observar, bem como o elevado ritmo das medições a efectuar, tornam imperativa a melhoria e o desenvolvimento dos equipamentos de aquisição, por forma a garantir a sua capacidade de registar, processar e validar um cada vez maior número de dados, em cada vez mais curtos intervalos de tempo.
- Sistemas de gestão da informação recolhida; - a crescente complexidade dos fenómenos a observar, bem como o elevado ritmo das medições a efectuar, impõem a continuação da melhoria e desenvolvimento dos sistemas computadorizados de elevada robustez e estabilidade (computadores industriais), por forma a garantir-lhes a manutenção de uma capacidade adequada à resolução dos problemas colocados pelo estudo dos fenómenos em jogo. Em particular, no domínio da verificação das condições de segurança estrutural, é forçoso prosseguir

nas actividades inerentes à garantia da detecção automática de situações de alerta e de alarme, por forma a poder prevenir e, se possível, evitar situações de risco estrutural, incluindo o próprio colapso.

- Novas técnicas e equipamentos de observação – um dos aspectos de maior relevância, no âmbito dos progressos registados nos últimos anos, tem a ver com o surgimento de novas técnicas e equipamentos destinados à monitorização das estruturas. Julga-se que também nos próximos anos deles virá um importante contributo para o sucesso da observação estrutural. Refiram-se em particular o papel já hoje destacado dos sensores de fibra óptica, das estações totais, do GPS, ou dos sensores com transmissão *wireless*, e de cujo desenvolvimento e aperfeiçoamento ainda temos, por certo, muito a esperar.
- Alimentação eléctrica dos sistemas de monitorização – Forçoso será também garantir o desenvolvimento e aperfeiçoamento de soluções adequadas para a alimentação eléctrica dos sistemas de monitorização, nomeadamente pelo recurso a painéis solares mais eficazes e associados a acumuladores efectivamente fiáveis, que garantam uma autonomia e uma protecção de equipamentos destinados a situações de campo cada vez mais agressivas.
- Sistemas de acesso remoto – Ainda que o tratamento de dados venha a ser progressivamente efectuado *in situ*, é imprescindível continuar assegurar uma comunicação rápida e segura entre o centro de estudos e as unidades computadorizadas instaladas em obra, através nomeadamente de sistemas de acesso remoto à informação que igualmente urge aperfeiçoar e desenvolver, e que utilizam actualmente a linha telefónica, o GSM ou as redes LAN de fibra óptica com ligação à *Internet*.

7. Agradecimentos

Esta apresentação resulta directamente da experiência obtida no Núcleo de Observação de Estruturas do LNEC, que, como se referiu na introdução, conta já com mais de 60 anos de actividades de experimentação *in situ* de estruturas de grande porte, nomeadamente de pontes.

Agradeço, nomeadamente, a colaboração e os comentários recebidos dos investigadores deste Núcleo, designadamente dos Eng^{os} Paulo Silveira, Luís Oliveira Santos, Jorge Rodrigues, Teresa Oliveira Santos e Xu Min.

REFERÊNCIAS

- [1] Marecos, José (Ed.) – *The 40 years of LNEC experience on observation and testing of bridges and special structures*, 1986, LNEC.
- [2] Fernandes, J. Almeida; Santos, L. Oliveira – “A experiência do LNEC no âmbito da monitorização de pontes de betão”, Seminário Segurança e Reabilitação das pontes em Portugal, 2001, FEUP.

- [3] Fernandes, J. Almeida – *Observação de pontes atirantadas de betão*, Programa de investigação, Provas de acesso a Investigador Coordenador, 1994, LNEC.
- [4] Marecos, José – *Arrábida Bridge. Observation of the structure*, Monograph, 1963, LNEC.
- [5] Marecos, José; Castanheta, M.; Trigo, J. Teixeira – “Field Observation of Tagus River Suspension Bridge”, *J. Struct. Division*, ASCE, Vol. 95, No ST4, April 1969, pp 555-583.
- [6] Santos, L. Oliveira – *Controlo estrutural da construção de pontes atirantadas de betão*, Dissertação de mestrado, 1992, IST.
- [7] Silveira, Paulo – *A influência das acções térmicas no comportamento de pontes de betão armado e pré-esforçado*, Dissertação de doutoramento, 1993, IST.
- [8] Santos, C. Pina; Fernandes, J. Almeida; Santos, L. Oliveira – “Estudo do comportamento térmico de tirantes”, *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, 1994, LNEC.
- [9] Rodrigues, Jorge – *Avaliação experimental das frequências dos tirantes da ponte rodoviária sobre o rio Tejo em Santarém*, Relatório 107/2000, LNEC.
- [10] Santos, Teresa O. – *Retracção e fluência do betão observadas in situ*, Dissertação de mestrado, 1995, IST.
- [11] Santos, Teresa O. – *Retracção do betão em pontes. Observação e análise*, Dissertação de doutoramento, 2006, UNL/FCT.
- [12] Santos, L. Oliveira – *Observação e análise do comportamento diferido de pontes de betão*, Dissertação de doutoramento, 2001, IST.
- [13] Fernandes, J. Almeida; Silveira, P.; Santos, Teresa O.; Neves, Sandra – “Observação da Nova Ponte Rodoviária da Régua”, *JPEE98*, 1998, LNEC, pp. 627-636.
- [14] Rodrigues, Jorge – *Identificação Modal Estocástica. Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*, Dissertação de doutoramento, 2004, FEUP.
- [15] Salta, Manuela; Pereira, Elsa – “Monitorização da corrosão em estruturas de betão armado”, *JPEE98*, 1998.
- [16] Vânia Marecos – *Controlo da segurança de pontes em tempo real*. Dissertação de Mestrado no IST, TM25. 2008 LNEC; ISBN 978-972-49-2130-3.
- [17] Fernandes, J. Almeida; Santos, L. Oliveira (Edt.) – *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, 1994, LNEC.