

# A EXPERIÊNCIA DO LNEC NO ÂMBITO DA MONITORIZAÇÃO DE PONTES DE BETÃO



J. Almeida Fernandes  
Investig. Coordenador  
LNEC  
Lisboa



L. Oliveira Santos  
Assist. de Investigação  
LNEC  
Lisboa

## SUMÁRIO

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 a metodologia do estudo experimental das estruturas, incluindo as provas de carga realizadas no final da construção.

## 1. INTRODUÇÃO

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

A observação do comportamento das estruturas de betão 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 interior das secções antes da sua betonagem. Tal implica um conhecimento adequado de cada processo construtivo, e a subordinação ao ritmo imposto pelas actividades da construção. Nesta 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, e a observação e análise do comportamento estrutural em serviço, por um período em geral de cerca de 10 anos, por forma a concluir da manutenção da segurança e da qualidade estrutural exigidas para a obra em causa [2].

Sem prejuízo destes dois objectivos, nem perda da independência necessária à manutenção da capacidade de julgar, em cada momento, 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 por parte dos técnicos do LNEC das naturais complexidades científicas e técnicas, características de cada empreendimento.

É indiscutível o enorme relevo internacional das primeiras observações efectuadas pelo LNEC em grandes pontes em Portugal, como é o caso da ponte de Arrábida [3], no rio Douro, e da ponte suspensa sobre o rio Tejo [4], 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, imprimiu nos últimos anos um muito mais elevado ritmo e fez aumentar enormemente a complexidade das actividades de observação de estruturas em Portugal. Tal bem se expressa no facto de cerca de 50% das observações de estruturas de grandes empreendimentos a cargo do LNEC se terem verificado nos últimos 12 anos, e de que cerca de 60% dos cerca 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 sistematizada com vista ao estudo do comportamento real das obras, e sua comparação com o comportamento previsto a partir da modelação implementada, e à aferição do desempenho das construções ao longo da sua vida útil, avaliando a sua segurança e funcionalidade.

Assim, podem elencar-se entre os principais objectivos da Observação de Estruturas os seguintes: verificação (ou não) das teorias de comportamento; detecção em tempo oportuno de eventuais deficiências estruturais; obtenção de importantes estados de referência para o futuro; 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 cuidadosa das técnicas a adoptar, dos equipamentos a utilizar e dos processos mais adequados de instalação em obra desses equipamentos [5].

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), facilidade no seu transporte e estabilidade do 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, por forma a se poder concluir, com razoável confiança, da 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, normalmente instalados no interior do betão, 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 gabinete de estudos (por exemplo, através de modem com telefones celulares).

No que respeita 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, deslocamentos relativos, rotações e temperaturas, e grandezas indirectas, deduzidas a partir das anteriores, como as tensões e os 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 relativo 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 neste capítulo referir algumas das técnicas mais utilizadas na observação do comportamento estrutural de pontes de betão.

### 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, definidos como absolutos, 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 absolutos, importa igualmente medir os deslocamentos relativos nas juntas que separam a estrutura do exterior, observação que se inicia no final da construção, antes da realização dos ensaios estáticos, situação em que se observam por vezes deslocamentos elevados (16 cm de amplitude no caso da Ponte do Guadiana, por exemplo) e que continua durante a vida da obra, controlando 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 de forma expedita com telescópios tipo LNEC (deflectómetros mecânicos de grande dimensão, elevado campo de medida e 1 mm de precisão). A abertura das juntas pode ainda ser aferida a partir da instalação de aparelhos eléctricos, nomeadamente do tipo LVDT (Figura 1).

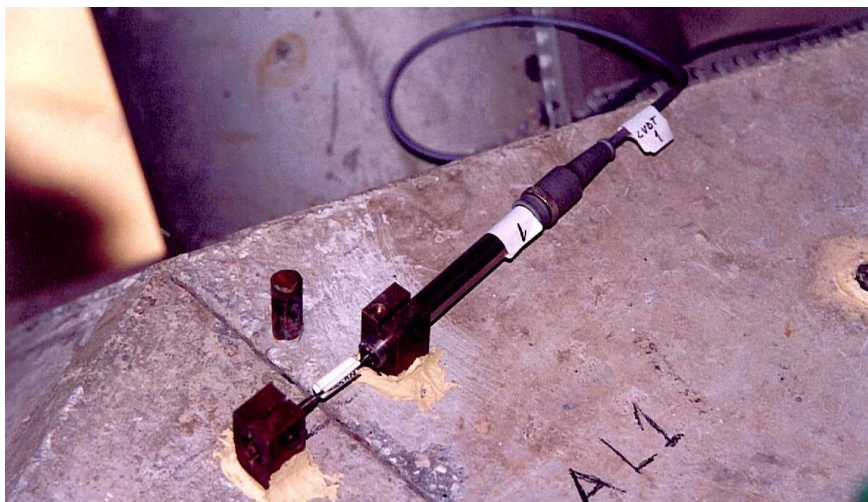


Figura 1 – Utilização de um LVDT na medição da abertura de uma junta

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 1 a 2 mm de precisão.



Figura 2 – Utilização de uma célula de pressão para através de um sistema de níveis líquidos proceder à medição de deslocamentos verticais

A medição de rotações desde o início da construção, é também de grande importância. É, em geral, efectuada através de clinómetros mecânicos de bolha de ar, de 2 segundos sexagesimais de precisão, fornece uma informação da maior importância sobre a manutenção da verticalidade dos pilares e de outros elementos verticais. Após a conclusão da obra, poderão ser montados clinómetros eléctricos, em particular nos pontos de menor acessibilidade.



Figura 3 – Clinómetro de bolha de ar

### 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 em betão devem ser instalados termómetros eléctricos de resistência dispostos segundo as diversas espessuras das secções consideradas mais representativas [6]. Estas medições são de importância fundamental para a condução do processo construtivo.

Em alternativa aos termómetros eléctricos de resistência, utilizam-se por vezes pares termoeléctricos, os quais, embora de menor custo, apresentam no entanto maior dificuldade no processamento automático das medições.

No que respeita à medição das temperaturas em tirantes, deve-se evitar a colocação de termómetros no interior da sua protecção anti-corrosão, por forma a não prejudicar essa 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 [7].

### 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 cerca de cinquenta 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 as torna inoperativas para uma resposta dinâmica. Nestas situações, que se desenvolvem apenas durante os ensaios dinâmicos, a instrumentação deverá ser complementada com extensómetros eléctricos de resistência instalados em chapas metálicas com 20 a 30 cm de extensão, instaladas sob tensão nas superfícies das peças de betão.

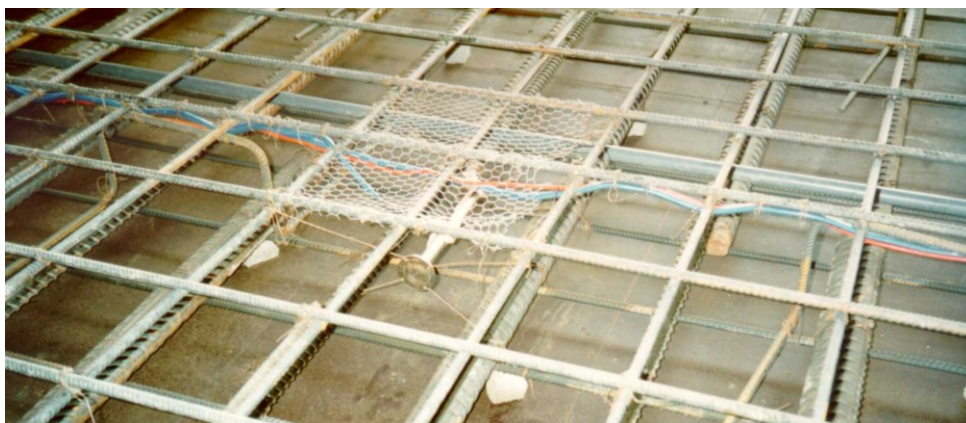


Figura 4 – Extensómetro de corda vibrante

Um segundo inconveniente, por vezes muito inoportuno, resulta do facto de a corda de aço em vibração no interior dos extensómetros poder entrar em vibração forçada em consequência da interacção com outro fenómeno vibratório da própria estrutura. Embora a frequência própria destas cordas, da ordem dos 500 a 700 Hz, seja muito superior às frequências dos primeiros modos das estruturas dos edifícios e pontes, em geral de apenas alguns ciclos por segundo, a instabilidade provocada pela vibração da estrutura pode induzir em erro os frequencímetros automáticos utilizados na medição destas células. Tais situações originam perdas momentâneas de operacionalidade de determinadas células de corda vibrante, em particular as situadas nas secções instrumentadas nas zonas de maior flexibilidade da estrutura.

Os extensómetros instalados no interior das peças estruturais são habitualmente designados por extensómetros activos, por oposição às células idênticas instaladas 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. Porém, após a sua instalação, ambas as extremidades dos tirantes junto às placas de amarração são seladas de forma a assegurar a sua protecção à corrosão, sendo retirados os referidos extensómetros eléctricos de resistência por razões de durabilidade. 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) [8].

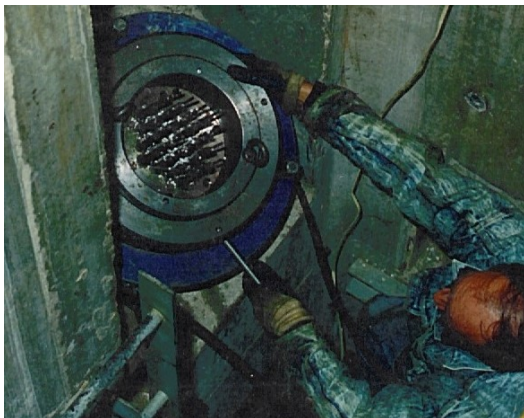


Figura 5 – Anel dinamométrico na medição da força instalada num tirante

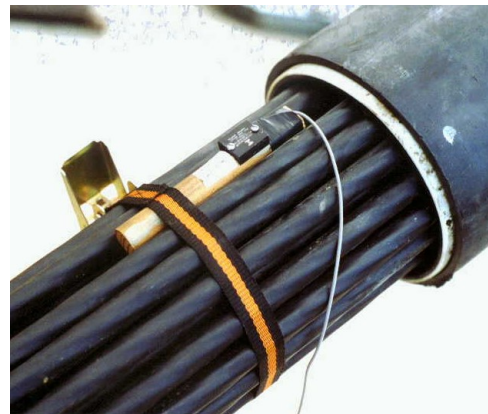


Figura 6 – Acelerómetro para a medição da força num tirante através do método da vibração

No entanto, ambos os métodos 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, interactuam entre si ao transmitirem essas vibrações à estrutura. Por consequência é por vezes muito difícil identificar a vibração livre desses tirantes em torno do seu modo fundamental. Acresce ainda a dificuldade induzida pela constituição do próprio tirante. De facto, sendo os modernos tirantes constituídos por feixes de cordões independentes entre si e autoprotégidos, a sua união, assegurada por braçadeiras afastadas entre si de distâncias superiores a 50 m, nunca é perfeitamente concretizada. Em consequência, existe ainda uma componente de vibração dos próprios cordões isolados, a qual dá aliás origem a um característico efeito sonoro e vai igualmente interferir com a pesquisa do primeiro modo do conjunto de cordões que compõem o tirante.

Porém, quando é utilizado o processo de isotensão, e tirando partido do facto de todos os cordões de um tirante estarem sujeitos à mesma tensão, a instrumentação, entre a placa e o bloco de ancoragem, de alguns desses cordões com células de carga equipadas com extensómetros eléctricos de resistência e que não comprometem durabilidade do tirante, permite aliar uma boa fiabilidade na medição a um custo muito mais moderado do que o anel dinamométrico. Este método foi utilizado na construção da ponte Salgueiro Maia, em Santarém, mantendo-se na observação a longo prazo (Figura 7).

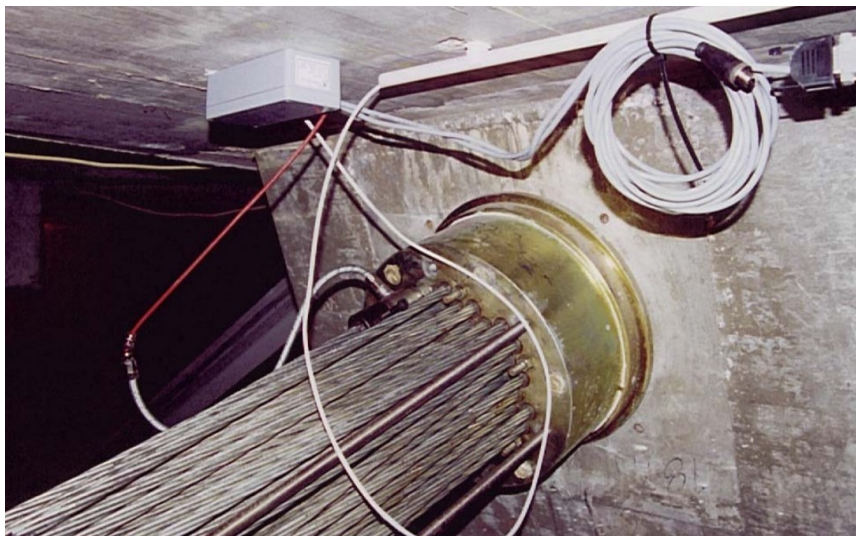


Figura 7 – Utilização de células de carga na medição da força instalada num tirante

### 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.



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, fornecendo 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.

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.

Os primeiros provetes recebem o nome de provetes compensadores de retracção ou termo-higrométricos e os segundos o de compensadores de fluência. Na realidade, para obter uma correcta avaliação de qualquer destes dois efeitos, há que saber separar ainda a parcela relativa à temperatura. No entanto, uma vez que se preconiza a utilização de células de corda vibrante e desde que não se verifiquem variações muito rápidas de temperatura (utilizando por exemplo de preferência medições nocturnas ou das primeiras horas do dia), em geral estas células compensam esses mesmos efeitos de origem térmica de tipo uniforme.

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.

Os provetes compensadores utilizados nas pontes de avanços, normalmente em caixão, são materializados por prismas em geral de secção quadrada com cerca de 30 cm de aresta e um comprimento que varia entre 60 e 75 cm. Estes prismas são normalmente impermeabilizados em duas faces opostas, para tentar reproduzir uma espessura equivalente igual à dimensão da aresta do provete. No interior destes prismas, executados com o mesmo betão da respectiva aduela instrumentada com os extensómetros activos, é igualmente instalado um extensómetro de corda vibrante (extensómetro compensador), que fornecerá leituras em simultâneo com as instaladas na secção real. Parte desses prismas não sofrerão qualquer solicitação. A outra parte será instalada em dispositivos especiais, denominados sistemas de fluência, sendo carregados sob tensão constante a partir de determinadas idades do betão.

Os prismas de retracção e os sistemas de fluência deveriam ser, se possível, instalados em aberturas a realizar nas lajes e nas almas da secção a instrumentar. No entanto, a grande densidade de armaduras ordinárias e de pré-esforço, existentes nos diferentes elementos estruturais que compõem a secção do tabuleiro, inviabiliza normalmente a existência dessas aberturas, razão pela qual estes provetes compensadores acabam por ser dispostos no interior do caixão e sobre o tabuleiro, nas suas zonas laterais (Figura 8).

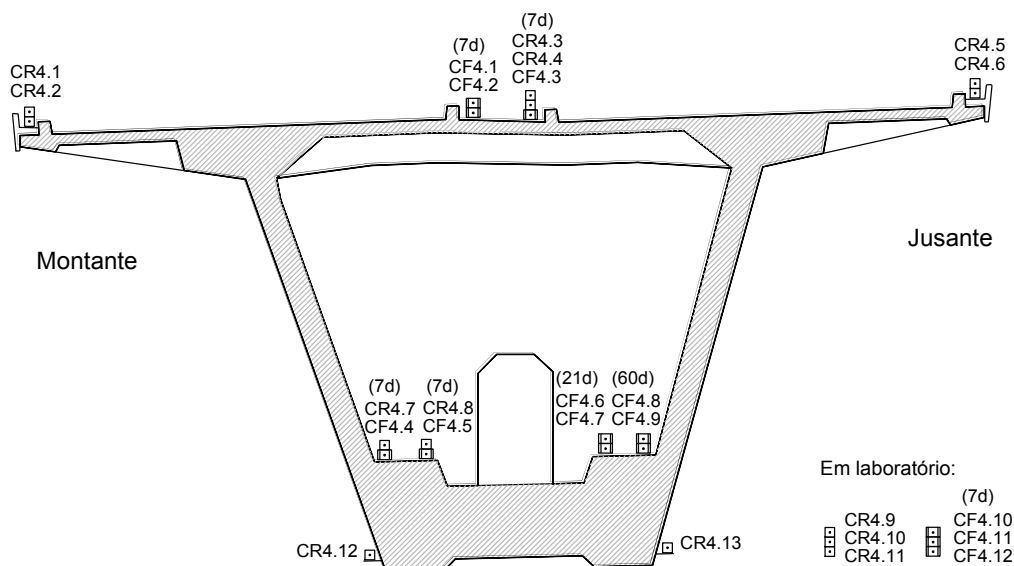


Figura 8 – Compensadores de fluência e termo-higrométricos (Ponte Miguel Torga) [9]

Parte destes prismas deve ser enviada para laboratório, para serem mantidos em salas de ambiente condicionado, por forma a se poder avaliar qual a parcela dos efeitos diferidos é devida apenas ao próprio material (parcela intrínseca dos efeitos diferidos), sem que se verifiquem as perturbações normalmente exercidas pelos agentes ambientais.

Apesar de ser elevado o número de pontes de betão já instrumentadas pelo LNEC, não foi ainda possível estabelecer uma correlação totalmente satisfatória entre a informação obtida com os provetes compensadores e os efeitos diferidos existentes na respectiva secção instrumentada [10]. Por essa razão continuam em curso estudos experimentais para este efeito [11].

A quantificação dos efeitos diferidos a partir das medições efectuadas nos provetes compensadores exige, ainda, a realização de dois outros tipos de provetes complementares, também realizados com o mesmo betão da secção a instrumentar, destinados a ensaios a realizar em laboratório para a aferição da própria constante das células de corda vibrante (provetes cilíndricos também instrumentados) e para a determinação experimental da evolução no tempo do módulo de elasticidade do betão (provetes cilíndricos executados em betão). Igualmente, particular atenção é prestada à determinação em laboratório da evolução da tensão de rotura do betão, através de um programa de ensaio de cubos a diferentes idades do betão.

Toda a informação disponível sobre o andamento da obra deve ser igualmente retida, designadamente quanto ao tipo de evolução dos esforços nas secções activas [12, 13] e quanto à recolha de dados fornecidos pela estação meteorológica da obra, respeitando à temperatura e humidade relativa do ar à sombra (abrigo de Stevenson), precipitação, rumo e velocidade do vento, radiação solar, etc..

### **3.7 - Observação dinâmica**

As observações dinâmicas das estruturas, realizadas em geral durante as provas de carga efectuadas no final da construção e antes da entrada em serviço, fazem apelo a uma instrumentação complementar específica para este efeito. O objectivo principal destes ensaios consiste normalmente na obtenção experimental das configurações e frequências dos principais modos de vibração e respectivos amortecimentos e sua confrontação com os valores numéricos obtidos no estudo sísmico elaborado na fase do projecto. Procura-se ainda obter dados experimentais relativos ao coeficiente dinâmico para cargas verticais através de ensaios do tipo impulsivo, realizados com a passagem de viaturas pesadas sobre ressaltos colocados no pavimento ou com a largada de pesos (Figura 9).

A aparelhagem de instrumentação necessária aos ensaios dinâmicos é normalmente centralizada numa única estação de observação, com recurso a um complexo sistema informático de aquisição, registo e tratamento da vultuosa informação obtida.

A título meramente indicativo refira-se que, para além do desenvolvimento de "software" próprio, específico para cada obra, é necessário efectuar a instalação de vários quilómetros de cabos para transmissão da informação obtida nas várias dezenas de sensores montados. São medidas temperaturas, forças, deslocamentos, rotações, extensões, velocidades e acelerações em pontos notáveis das estruturas. Em face da resposta dinâmica destas estruturas, parte destas grandezas exige a obtenção de grande número de dados no domínio do tempo, impondo intervalos entre medições consecutivas da ordem de 1/100 do segundo.

Tendo em vista, por outro lado, o controlo do comportamento sísmico das obras, é conveniente instalar macrossismógrafos alimentados a baterias de longa duração e com sistemas de



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

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 [8]. 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.

### **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 [14]. 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 entre si 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.

De entre as várias grandezas observadas, tem particular relevo pela sua globalidade, a medição dos deslocamentos lineares da superestrutura, realizada em geral por níveis líquidos ou por meios ópticos.

A centralização da medição de parte das células da corda vibrante, utilizadas em clinómetros ou nos extensómetros activos, deverá ser igualmente assegurada. O mesmo se aplica à centralização da medição de uma parte considerada significativa dos termómetros de resistência.

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 para este efeito dos sistemas de controlo disponíveis no mercado internacional. Atenção particular tem que ser dada à garantia da estabilidade e operacionalidade deste tipo de equipamentos, a actuar automaticamente e 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 informática própria. Ligando os vários dataloggers entre si, e adoptando um deles como Master, pode a partir deste centralizar-se todo o sistema de aquisição. Estabelecendo a comunicação do Master com um determinado gabinete de estudos do LNEC, através de modem e de telefones celulares, por exemplo, pode a partir desse centro

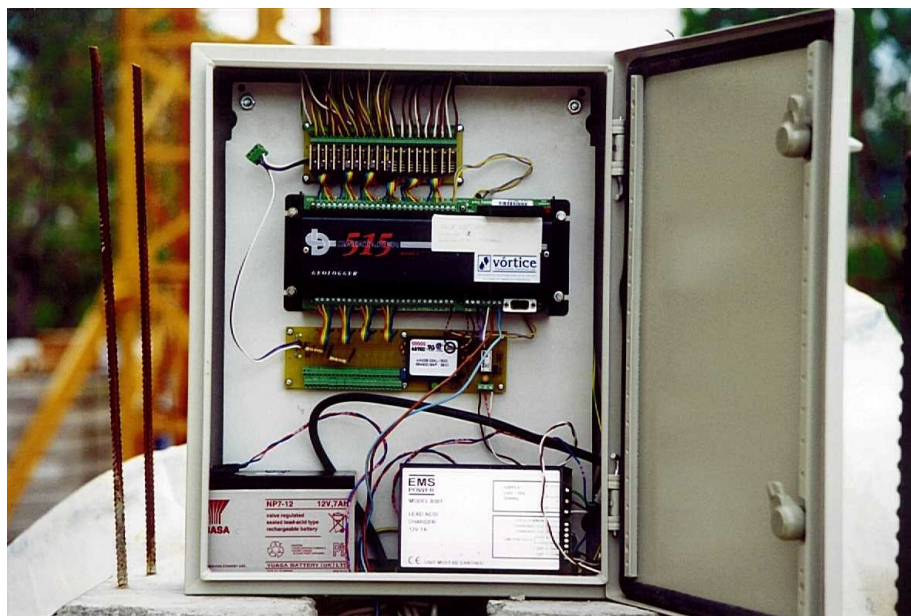


Figura 10 – Data logger instalado em obra

interrogar-se o sistema de aquisição ou alterar os programas de cada logger. Pode ainda desenvolver-se um sistema de alarme, o qual sempre que determinados parâmetros ultrapassem certos valores de referência, transmitirá a mensagem correspondente para o gabinete de estudos encarregue da segurança da obra.

#### **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.

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, por forma a 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.

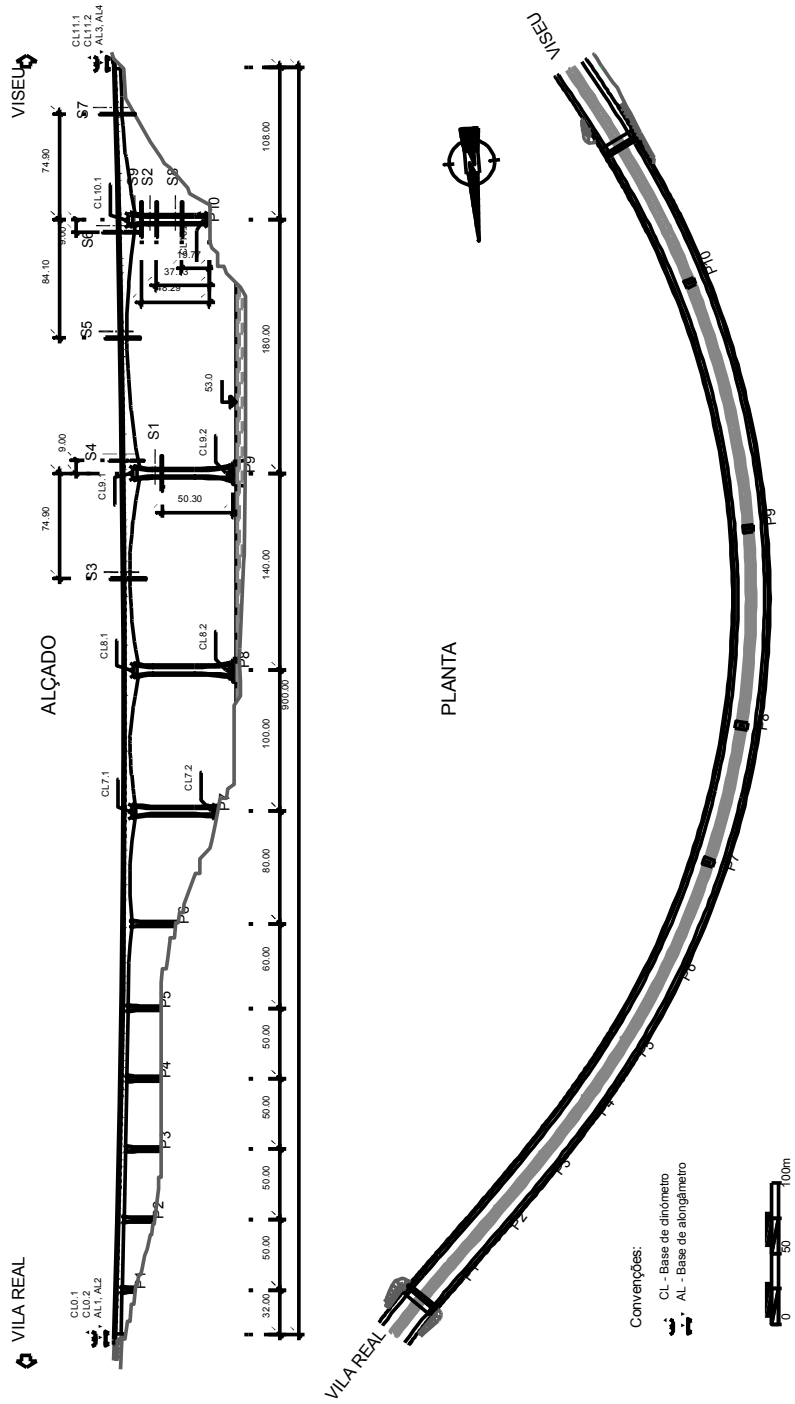


Figura 11 – Plano de observação da ponte Miguel Torga

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 cuidadoso) 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.



Figura 12 – Ensaio de carga em estruturas de dimensão corrente

Estes 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 13 – Ensaio de carga da ponte do Arade [15]

Estes ensaios 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.

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 projecto 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; o tipo, a disposição e o modo de actuação das cargas de ensaio a utilizar em cada fase; 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 menor 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. 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 – *Observação de pontes atirantadas de betão*, Programa de investigação, 1994, LNEC.
- [3] Marecos, José – *Arrábida Bridge. Observation of the structure*, Monograph, 1963, LNEC.
- [4] 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.
- [5] Santos, L. Oliveira – *Controlo estrutural da construção de pontes atirantadas de betão*, Dissertação de mestrado, 1992, IST.
- [6] Silveira, Paulo – *A influência das acções térmicas no comportamento de pontes de betão armado e pré-esforçado*, Tese de doutoramento, 1993, IST.
- [7] Santos, C. Pina; Fernandes, J. Almeida; Santos, L. Oliveira – “Estudo do comportamento térmico de tirantes”, *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, 1994, LNEC.
- [8] Rodrigues, Jorge – *Ensaio de caracterização dinâmica da ponte Salgueiro Maia em Santarém*, Relatório 271/2000, 2000, LNEC.
- [9] Fernandes, J. Almeida; Silveira, P.; Santos, Teresa O.; Neves, Sandra – “Observação da Nova Ponte Rodoviária da Régua”, *JPEE98*, 1998, LNEC, pp. 627-636.
- [10] EC2 – *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios*, NP ENV 1992-1-1:1998, 1998, IPQ.
- [11] Santos, Teresa O. – *Retracção e fluência do betão observadas in situ*, Dissertação de mestrado, 1995, IST.
- [12] Virtuoso, Francisco – *Análise de pontes curvas em caixão - Influência dos efeitos diferidos*, Dissertação de doutoramento, 1991, IST.
- [13] Santos, L. Oliveira – *Observação e análise do comportamento diferido de pontes de betão*, Dissertação de doutoramento, 2001, IST.
- [14] Salta, Manuela; Pereira, Elsa – “Monitorização da corrosão em estruturas de betão armado”, *JPEE98*, 1998.
- [15] Fernandes, J. Almeida; Santos, L. Oliveira (Edt.) – *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, 1994, LNEC.