

A EXPERIÊNCIA DO LNEC NA OBSERVAÇÃO E CONTROLO DA SEGURANÇA DE PONTES

João Almeida Fernandes
Investigador Coordenador
LNEC
Lisboa

Luís Oliveira Santos
Investigador Auxiliar
LNEC
Lisboa

SUMÁRIO

Apresenta-se no presente trabalho a experiência do LNEC no âmbito da observação de pontes. Referem-se os objectivos que se pretendem alcançar, as principais tarefas associadas à observação a longo prazo bem como à realização de ensaios de carga. Descrevem-se ainda as técnicas e equipamentos utilizados *in situ*, referindo-se também a evolução que se perspectiva para esta actividade.

1. INTRODUÇÃO

A observação do comportamento de estruturas, realizada durante as diferentes fases de construção e em serviço, permite a avaliação do seu desempenho com base em valores directamente medidos *in situ* e possibilita ainda a verificação das teorias de comportamento estrutural consideradas na modelação e na análise dessas estruturas. Resulta, por consequência, que a informação obtida através das medições realizadas na própria obra fornece indicações da maior utilidade para a compreensão dos fenómenos em jogo, podendo mesmo levar à correcção do modelo de cálculo ainda durante a fase construtiva. Assim, a observação do comportamento de uma estrutura e o tratamento dos dados resultantes dessa observação, para além de permitir o controlo da sua segurança, pode ainda ser utilizada para a melhoria da qualidade da própria obra (por exemplo, no controlo da sua geometria) e servir também para obter informação relevante tendo em vista o projecto de futuras construções similares.

A observação do comportamento de estruturas, nomeadamente de pontes de betão armado pré-esforçado, constitui uma actividade com longa tradição em Portugal, que tem sido essencialmente desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), e que mantém grande intensidade, dado o elevado número de obras observadas nos últimos quinze anos.

Os primeiros trabalhos neste domínio efectuados pelo LNEC foram apresentados internacionalmente em 1955 [1] e referem-se, entre outros, às observações de uma ponte em arco sobre o rio Sousa, da ponte de Santa Clara, em Coimbra, constituída por cinco tramos contínuos, e da ponte de Vala Nova, uma obra com três tramos contínuos em betão armado pré-esforçado. Posteriormente, merecem uma referência particular os estudos efectuados na ponte da Arrábida [2] e na ponte 25 de Abril [3].

Com o desenvolvimento dos meios de cálculo e com o grande incremento do número de obras construídas, a observação de pontes, tanto durante a construção como a longo prazo, apenas é efectuada em situações relevantes, quer pela importância ou complexidade das obras, quer pela sua dimensão.

Presentemente são objecto de observação, por parte do LNEC, diversas pontes de betão armado pré-esforçado: a ponte internacional de Valença, sobre o rio Minho, a ponte de Angueira, as pontes de S. João, do Freixo, de Resende e Miguel Torga, na Régua, todas sobre o rio Douro, a ponte Salgueiro Maia, sobre o rio Tejo em Santarém, a ponte de Alcácer do Sal, sobre o rio Sado, as pontes atirantadas do Arade e do Guadiana e, ainda, a estrutura principal da ampliação da pista do aeroporto do Funchal. Brevemente irá ser igualmente monitorizada a ponte 25 de Abril.

Na observação de pontes distinguem-se, normalmente, as fases correspondentes ao acompanhamento da construção, à realização de ensaios de carga e à observação a médio e longo prazo. Grande parte das grandezas a

observar e dos métodos de medição são comuns às três fases, referindo-se ao longo do presente texto quando se tratar de uma técnica de medição específica de alguma daquelas situações.

A observação do comportamento das estruturas de betão 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.

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.

2. OBJECTIVOS DA OBSERVAÇÃO DE ESTRUTURAS

Entende-se por *Observação de Estruturas* o conjunto de actividades analíticas 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 como principais objectivos da Observação de Estruturas: a verificação das teorias de comportamento; a detecção em tempo oportuno de eventuais deficiências estruturais; a obtenção de estados de referência para o futuro; a quantificação dos valores reais das acções.

3. OBSERVAÇÃO A 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, no qual se definem as grandezas a medir, as secções a instrumentar, os métodos de medição e os equipamentos a utilizar.

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.

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.

A título ilustrativo apresenta-se na Figura 1 a localização das secções instrumentadas da ponte de S. João no Porto. Na Figura 2 apresenta-se a evolução dos deslocamentos verticais na secção de meio vão do tramo principal (250 m) da ponte de S. João, cujos valores experimentais foram obtidos através de nivelamentos geométricos realizados pela REFER. Nesta figura inclui-se, igualmente, os valores provenientes do modelo de cálculo implementado [4]: duas curvas definem um intervalo com uma probabilidade de ocorrência de 90%, proveniente do cálculo probabilístico efectuado, referido como *Intervalo de 90%*; a curva média, proveniente do mesmo cálculo; finalmente uma curva obtida através de um cálculo determinístico aplicando directamente os modelos de retracção e de fluência do EC2 [5].

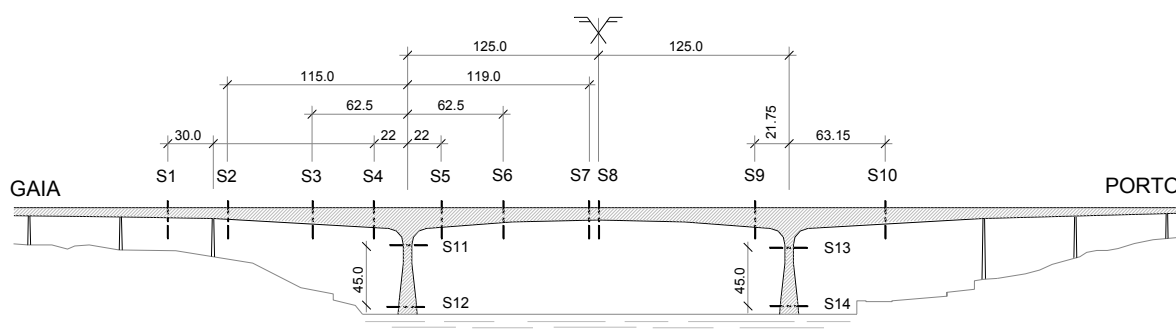


Figura 1– Plano de observação da Ponte de S. João: localização das secções instrumentadas

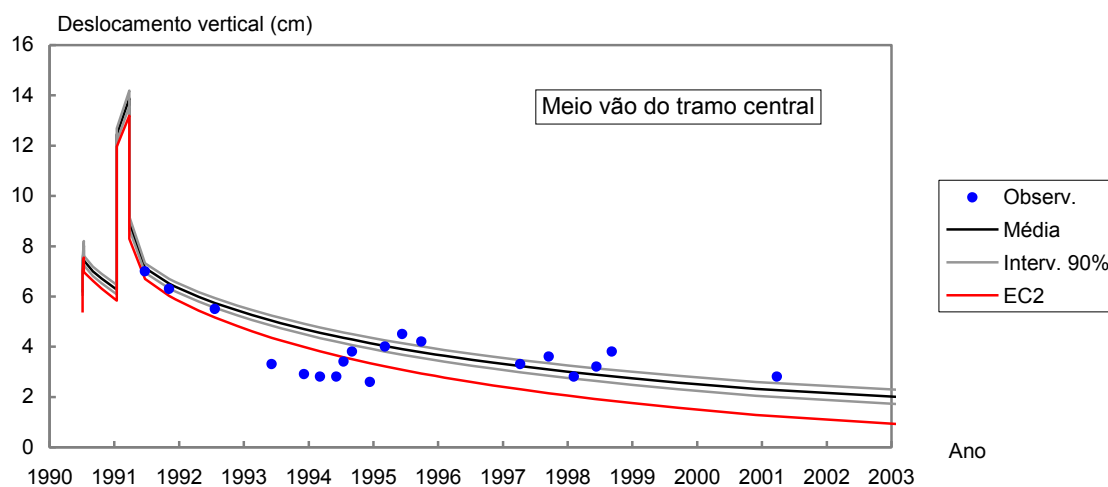


Figura 2– Ponte de S. João: deslocamentos verticais na secção de meio vão do tramo central

4. ENSAIOS DE CARGA

As estruturas instrumentadas durante a construção visando a observação a longo prazo são normalmente sujeitas a ensaios de carga no final da construção (Figura 3). Estes ensaios 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.

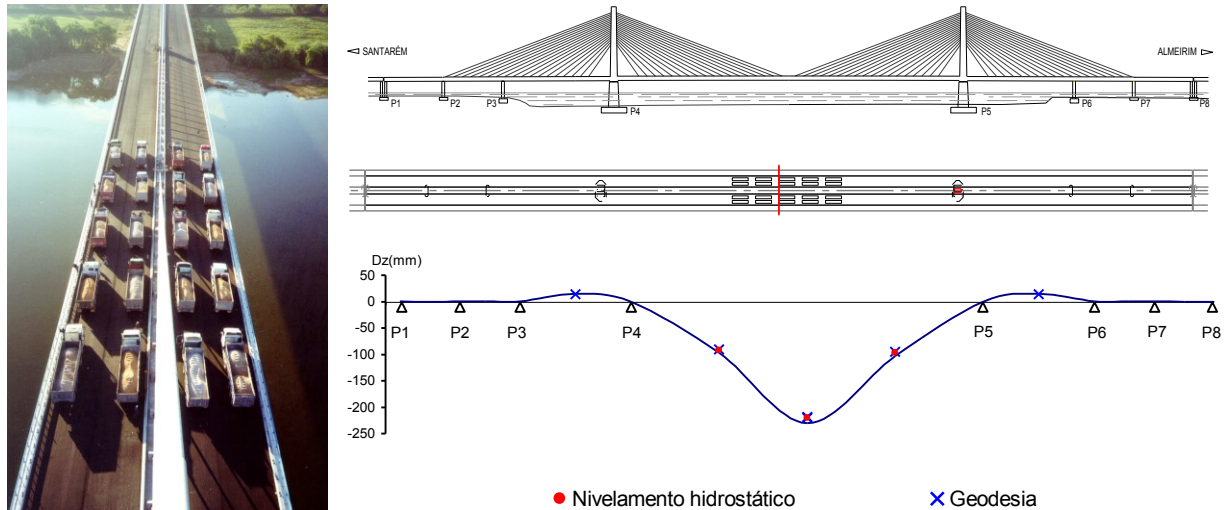


Figura 3 – Ensaio de carga da ponte Salgueiro Maia em Santarém: deformada do tabuleiro

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.

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 dimensões consideráveis ou mesmo correntes 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 4 e 5).

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.

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.



Figura 4 – Ensaio de carga do Viaduto sobre a ribeira da Vinha, na auto-estrada A2



Figura 5 – Ensaio de carga da ponte sobre o rio Arade, na auto-estrada A2

5. TÉCNICAS E EQUIPAMENTOS A UTILIZAR *IN SITU*

5.1 - 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 [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, para 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, começando-se por referir a forma como se procede à caracterização do betão, nomeadamente do seu comportamento diferido.

5.2 - Determinação *in situ* da retracção e fluência do betão

Para além dos ensaios laboratoriais realizados para a caracterização mecânica do betão, visando, designadamente, a evolução da tensão de rotura à compressão e do módulo de elasticidade, a caracterização *in situ* dos efeitos diferidos do betão torna-se necessária face à grande influência que têm na sua evolução condições ambientais, nomeadamente as variações de temperatura e de humidade relativa, bem como a radiação solar, a circulação do ar, a acção da chuva, a emissividade nocturna, etc. Esta avaliação 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.

A determinação *in situ* da retracção e da fluência é efectuada através de pares de provetes betonados em simultâneo com a estrutura, no interior dos quais fica instalado um extensómetro de corda vibrante, e que ficam sujeitos às mesmas condições ambientais. Num dos prismas (compensador termo-higrométrico) medem-se as extensões devidas às variações de temperatura e à retracção. No outro prisma (compensador de fluência) é aplicada uma tensão constante de compressão, considerando-se que as deformações devidas à tensão aplicada (deformações instantânea e de fluência) correspondem à diferença entre as deformações medidas nos dois provetes. Estes provetes são, em geral, colocados sobre o tabuleiro e no interior das secções em caixão, conforme se exemplifica na Figura 6.



Figura 6 – Prismas compensadores termo-higrométrico e de fluência

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 devida apenas ao próprio material, sem que se verifiquem as perturbações normalmente exercidas pelos agentes ambientais.

Toda a informação disponível sobre o andamento da obra deve ser igualmente retida, designadamente quanto ao tipo de evolução dos esforços nas secções activas [7], e quanto à recolha de dados fornecidos pela estação meteorológica da obra, respeitando à temperatura e humidade relativa do ar à sombra (abrigo da Stevenson), precipitação, rumo e velocidade do vento, radiação solar, etc..

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, razão por que continuam em curso estudos experimentais para este efeito.

5.3 - Medição de deslocamentos lineares

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. Tanto no decurso de um ensaio de carga como no âmbito de uma observação a longo prazo são diversos os métodos utilizados para determinação destes deslocamentos, destacando-se o recurso a deflectómetros registadores, a métodos geodésicos e a sistemas de nivelamento hidrostático.

A utilização de deflectómetros registadores é frequente em ensaios de carga, permitindo uma precisão de 2 mm. Implica o acesso à face inferior do tabuleiro nos pontos em que se pretende realizar a medição, sendo impossível a sua utilização em situações de atravessamento de cursos de água ou em obras de altura elevada.

Os métodos geodésicos correntemente utilizados na medição de deslocamentos verticais implicam a utilização de níveis de precisão e de teodolitos.

Nas diversas obras de arte cujo comportamento estrutural é observado pelo LNEC, ou mesmo nas que apenas são sujeitas a provas de carga, são colocadas bases de nivelamento e realizados nivelamentos geométricos do tabuleiro após o final da construção, ou nas obras ensaiadas, antes e após a realização dos ensaios (Figura 7). Pretende-se desta forma não só verificar a recuperação das deformações da estrutura após ter sido sujeita a sobrecargas significativas mas também obter valores de referência que possibilitem, através de novas operações de nivelamento, a avaliação do comportamento da obra ao longo da sua vida.

Embora em situações pontuais a medição de deslocamentos verticais durante a realização dos ensaios de carga tenha sido efectuada através de nivelamentos geométricos, como durante os ensaios da estrutura de ampliação do aeroporto da Madeira (Figura 8), de uma forma geral estes deslocamentos são estimados através teodolitos a partir das variações de ângulos zenitais medidas. Estes aparelhos, instalados em peças de centralização forçada, são normalmente colocados no interior do caixão que constitui o tabuleiro, visando alvos de pontaria óptica colocados nos diversos pontos objecto.



Figura 7 – Nivelamento do tabuleiro de um viaduto antes de um ensaio de carga



Figura 8 – A utilização de um nível de precisão durante o ensaio de carga do aeroporto da Madeira

Os teodolitos são ainda utilizados na medição de deslocamentos horizontais, sendo para esse efeito associados a um distanciómetro e visando alvos reflectores, tal como sucedeu para medir os deslocamentos no topo das torres das pontes atirantadas do Guadiana e do Arade durante os respectivos ensaios de carga [8].

Uma forma alternativa de medição de deslocamentos verticais é a utilização de um sistema de nivelamento hidrostático associado a sensores de pressão de muito elevada precisão (Figura 9). Este sistema que permite a medição de deslocamentos verticais com 1 a 2 mm de precisão, foi utilizado pelo LNEC pela primeira vez em 2000 no ensaio de carga da ponte Salgueiro Maia, em Santarém, sendo nessa ocasião as suas medições sido validadas através dos valores obtidos através de dois teodolitos (Figura 3). É um sistema que tem como importantes vantagens a realização automática das leituras, permitindo também a sua utilização na observação a longo prazo.

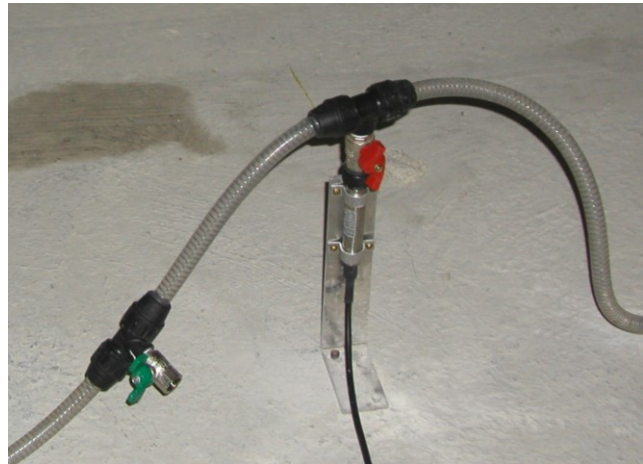


Figura 9 – Uma célula de pressão num sistema de nivelamento hidrostático

A utilização do sistema GPS (*Global Positioning System*) para a medição de deslocamentos verticais e horizontais constitui uma técnica inovadora, que já foi aplicada na observação da Humber Bridge [9], bem como na observação de uma ponte suspensa no Japão [10]. Este equipamento tem ainda algumas limitações em termos de precisão que poderão ser vencidos com o recurso a um número mais elevado de satélites, o que implica custos acrescidos. É uma técnica cuja utilização na observação da ponte 25 de Abril está a ser ponderada.

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.

A medição de rotações desde o início da construção, é também de grande importância, fornecendo informação da maior relevância sobre a manutenção da verticalidade dos pilares bem como sobre a deformação do tabuleiro. Tradicionalmente efectuada através de clinómetros mecânicos de bolha de ar (Figura 10), de 2 segundos sexagesimais de precisão, a tendência actual é a utilização de aparelhos que permitam a realização automática de leituras, como é o caso dos clinómetros eléctricos (Figura 11).



Figura 10 – Clinómetro de bolha de ar



Figura 11 – Clinómetro eléctrico

5.4 - 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 [11]. Estas medições são de importância fundamental para a condução do processo construtivo.

Em alternativa aos termómetros eléctricos de resistência, utilizam-se por vezes pares termoelectrónicos, 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 [12].

5.5 - Medição de extensões no interior do 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 12). 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 de indução ou com extensómetros eléctricos de resistência instalados em chapas metálicas com 20 a 30 cm de comprimento, colocadas sob tensão nas superfícies das peças de betão.

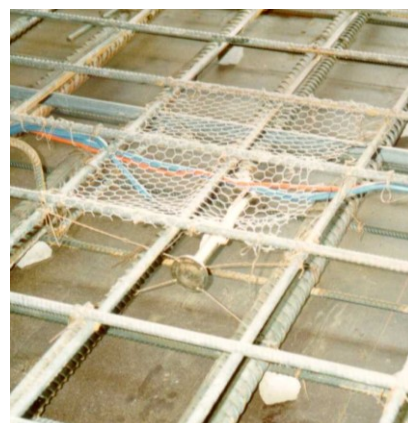


Figura 12 – Extensómetro de corda vibrante no interior do betão

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.

5.6 - 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 13) ou através do método da vibração pela identificação da frequência própria do tirante (Figura 14) [13].

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 15).



Figura 13 – Anel dinamométrico na medição da força instalada num tirante



Figura 14 – Acelerómetro para a medição da força num tirante através do método da vibração

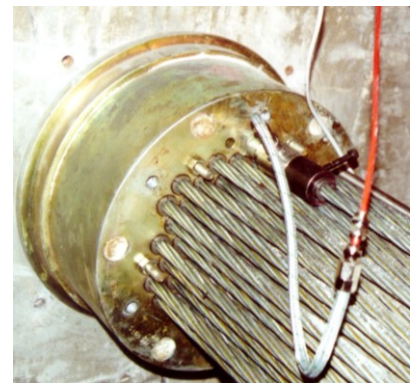


Figura 15 – Utilização de células de carga na medição da força instalada num tirante

5.7 - Observação dinâmica

As observações dinâmicas das estruturas fazem apelo a uma instrumentação complementar específica para este efeito. O objectivo principal dos ensaios de caracterização dinâmica das estruturas consiste normalmente na obtenção experimental das configurações e frequências dos principais modos de vibração e respectivos amortecimentos e sua confrontação com os valores numéricos.

Graças à elevada sensibilidade dos sensores utilizados (Figura 16) estes ensaios podem realizar-se tanto quando a ponte é solicitada apenas por acções ambientais, nomeadamente, o vento, bem como quando a estrutura está sujeita ao tráfego decorrente da sua utilização normal. Esta versatilidade tem contribuído para a solicitação crescente destes ensaios, como está bem patente nos trabalhos de Rodrigues [14].

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 17).

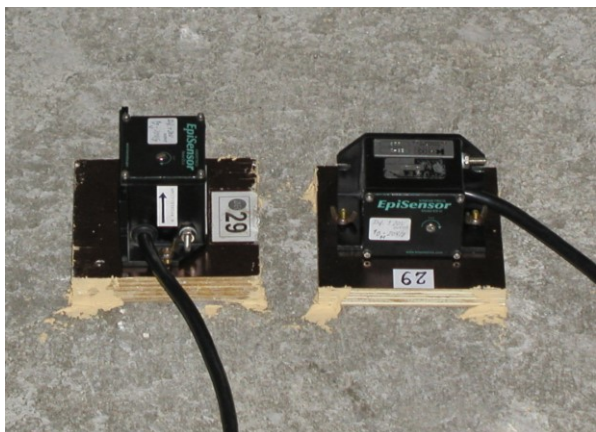


Figura 16 – Acelerómetros uniaxiais de marca *Kinematics* e modelo *EpiSensor* (ES-U)



Figura 17 – Ensaio impulsivo no Aeroporto da Madeira: libertação de uma massa de 61 400 kg

Em face da resposta dinâmica destas estruturas, parte destas grandezas exige a obtenção de grande número de dados no domínio do tempo, frequências de aquisição de 200 a 1000 Hz.

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 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 [14]. 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.

5.8 - 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.

5.9 - 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 geodésicos.

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 18) 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, através de modem e de telefones celulares, por exemplo, pode a partir desse centro 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 valores de referência, transmitirá a mensagem correspondente para o gabinete de estudos encarregue da segurança da obra.

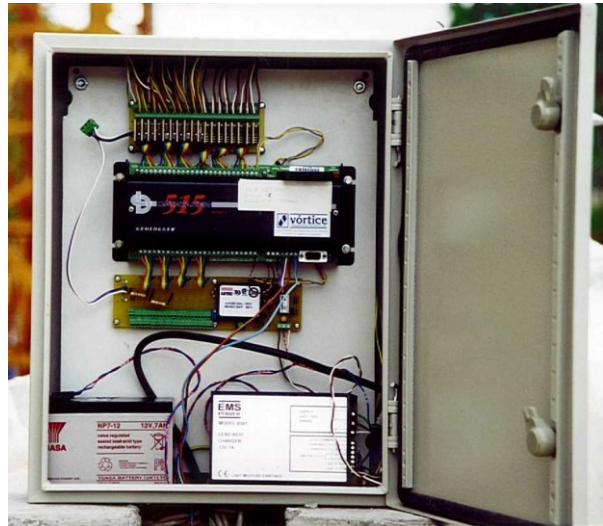


Figura 18 – *Data logger* instalado em obra

5.10 Campanhas periódicas de observação

A realização de campanhas periódicas desempenha um lugar muito importante e insubstituível na observação de pontes. Durante essas campanhas, para além de poderem ser recolhidos os resultados arquivados nos *data logger* para um computador portátil, se necessário, e de serem efectuadas as leituras dos aparelhos não abrangidos pela leitura automática, é realizada uma inspecção geral à obra.

Nesta inspecção geral devem ser seguidos procedimentos específicos [16], merecendo especial atenção o aspecto superficial do betão, nomeadamente o aparecimento de fendas, manchas, sinais de corrosão ou qualquer sinal de degradação do próprio betão, e a verificação do bom funcionamento do equipamento da obra, como juntas de dilatação e aparelhos de apoio. Qualquer ocorrência deve ser devidamente registada e, tanto quanto for possível, quantificada. É esse, por exemplo, o caso das fendas cuja localização deve ser registada, para além de ser assinalada na própria estrutura, e cujas dimensões, comprimento e abertura, devem ser medidas periodicamente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se neste capítulo, de forma sucinta, a metodologia seguida pelo LNEC na observação do comportamento estrutural de pontes de betão, para além de se referirem algumas técnicas que se perspectiva venham a brevemente a ser utilizadas. Esta metodologia engloba a caracterização do betão e a medição de diversas grandezas na estrutura.

A caracterização do betão consiste na determinação da tensão de rotura e do módulo de elasticidade, através de ensaios de laboratório, e no estudo da retração e fluência *in situ* através de provetes compensadores.

Embora variando um pouco com as características de cada obra, a observação do comportamento estrutural de uma ponte compreende a medição de deslocamentos verticais do tabuleiro, a abertura de juntas de dilatação, de rotações na base e no topo dos pilares e de extensões e de temperaturas no interior do betão. Em todas as obras estão montadas bases para a realização de nivelamentos geométricos de precisão, que permitem controlar os deslocamentos verticais do tabuleiro.

A tendência actual na observação de estruturas pauta-se pela progressiva substituição dos aparelhos mecânicos por aparelhos que permitam a realização automática de leituras. Este processo de transição que já se iniciou com a introdução do sistema de nivelamento hidrostático associado a células de pressão para a medição dos

deslocamentos verticais do tabuleiro, bem como da utilização de clinómetros eléctricos para a medição das rotações, poderá ainda ser completado com a utilização de extensómetros eléctricos de indução do tipo LVDT para o controlo da evolução da abertura de juntas de dilatação.

A utilização de sensores de fibras ópticas para a medição de diversas grandezas, como deslocamentos, extensões, acelerações, forças, pressão e temperatura, é uma técnica recente, bastante promissora, e que terá uma utilização crescente. As suas principais vantagens são a grande sensibilidade, a imunidade a interferências electromagnéticas e a relativa imunidade a ambientes agressivos [17].

A utilização do sistema GPS para a medição de deslocamentos verticais e horizontais constitui também uma técnica que certamente se irá impor na observação de estruturas, preferencialmente em obras em que se verifiquem deslocamentos de grande amplitude como nas pontes suspensas.

O aperfeiçoamento da metodologia utilizada na observação do comportamento estrutural de pontes poderá beneficiar muito da acentuada evolução tecnológica que actualmente se verifica e é essencial para dar resposta à evolução verificada nas soluções estruturais de pontes de betão, cada vez mais complexas e arrojadas.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Rocha, Manuel; Borges, J. Ferry; Marecos, J. – “Observation of some reinforced concrete structures”, *Symposium on the Observation of Structures*, RILEM, Lisbon, 1955, pp 729-753.
- [2] Marecos, José – *Arrábida Bridge. Observation of the structure*, Monograph, 1963, LNEC.
- [3] 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.
- [4] Santos, L. Oliveira – *Observação e análise do comportamento diferido de pontes de betão*, Dissertação de doutoramento, 2001, IST.
- [5] EC2 – Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios, NP ENV 1992-1-1:1998, 1998, IPQ.
- [6] Fernandes, J. Almeida – *Observação de pontes atirantadas de betão*, Programa de investigação, 1994, LNEC.
- [7] Virtuoso, Francisco – *Análise de pontes curvas em caixão - Influência dos efeitos diferidos*, Dissertação de doutoramento, 1991, IST.
- [8] Fernandes, J. Almeida; Santos, L. Oliveira (Edt.) – *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, 1994, LNEC.
- [9] Armer, G. S. T. (Edt). – *Monitoring and assessment of structures*, Spon Press, 2001.
- [10] Nakamura, S.-I.; Sakamoto, Y.; Fujino, Y.; Yanagihara, M. – “Monitoring of Displacements on Suspension Bridges using GPS”, *IABSE Symposium*, Rio de Janeiro, pp 459-466, 1999.
- [11] Silveira, Paulo – *A influência das acções térmicas no comportamento de pontes de betão armado e pré-esforçado*, Tese de doutoramento, 1993, IST.
- [12] Santos, C. Pina; Fernandes, J. Almeida; Santos, L. Oliveira – “Estudo do comportamento térmico de tirantes”, *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, 1994, LNEC.
- [13] Rodrigues, Jorge – *Ensaio de caracterização dinâmica da ponte Salgueiro Maia em Santarém*, Relatório 271/2000, 2000, LNEC.
- [14] Rodrigues, Jorge – *Identificação modal estocástica – Métodos de análise e aplicação em estruturas de engenharia civil*, Dissertação de doutoramento, 2003, FEUP.
- [15] Salta, Manuela; Pereira, Elsa – “Monitorização da corrosão em estruturas de betão armado”, *JPEE98*, 1998.
- [16] CEB-FIP – *Strategies for testing and assessment of concrete structures*, Bulletin d’information n° 243, Comité Euro-International du Béton, 1998.
- [17] Measures, Raymond M. – *Structural monitoring with fiber optic technology*, Academic Press, 2001.
- [18] Fib – *Monitoring and safety evaluation of existing structures*, state-of-art report, bulletin 22, fib, 2003.