

## ***INSPECÇÃO, DIAGNÓSTICO, CONSERVAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DE PONTES***

PAULO J. S. CRUZ

*PROFESSOR ASSOCIADO COM AGREGAÇÃO, UNIVERSIDADE DO MINHO*

### **RESUMO**

O estudo do ciclo de vida útil de pontes é um tema de crescente actualidade. Com efeito, o número de pontes é tão elevado que as administrações necessitam de investir cada vez mais dinheiro na inspecção e conservação das mesmas.

A comunidade científica nacional e internacional e as administrações rodoviária e ferroviária começam a dedicar a maior atenção ao vastíssimo campo do conhecimento que inclui a segurança, a inspecção, o diagnóstico, a gestão da conservação e a monitorização de pontes.

Neste artigo serão apresentadas as possibilidades actuais e alguns dos desafios neste domínio, que constitui a linha condutora da investigação do grupo de pontes da Universidade do Minho.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os custos estimados de conservação de pontes são cada vez mais importantes e serão um pesado fardo para as economias das gerações vindouras. Apesar da dimensão do problema, muitas das decisões relacionadas com este tema são, ainda, tomadas tendo por base o dia a dia, sob uma enorme pressão de colocar as estruturas em serviço o mais rapidamente possível e pelo menor custo. Esta situação impede que se realize uma análise a longo prazo e que os escassos recursos disponíveis sejam investidos onde são mais necessários.

Estima-se que nos Estados Unidos aproximadamente 40 % das pontes, necessitam de algum tipo de reparação ou reabilitação. Uma percentagem significativa dessas pontes foi construída na década de 1930 [1]. Na Europa, a maior parte da construção foi levada a cabo depois da II Guerra Mundial. Por esse facto, a maioria dessas pontes tem hoje mais de 40 anos e a situação começa a parecer-se com a dos Estados Unidos.

Para ter uma ordem de grandeza dos montantes envolvidos com a inspecção e conservação de pontes podem ser referidos os seguintes exemplos: estima-se que a administração rodoviária finlandesa gaste anualmente um milhão de euros na inspecção das suas pontes; o orçamento da administração rodoviária dinamarquesa, para a conservação das suas pontes, ascende a cerca de vinte e quatro milhões de euros; em França estima-se que o orçamento anual para a inspecção e conservação de pontes excede os cem milhões de euros; na Alemanha o orçamento para a

conservação e reabilitação de pontes aproxima-se dos quinhentos milhões de euros; na Suécia o orçamento anual para a conservação é da mesma ordem de grandeza do orçamento para a construção de novas pontes, ascendendo a cerca de noventa milhões de euros; na Suíça o orçamento anual para a conservação de pontes atinge os cento e quarenta milhões de euros [2].

O reconhecimento da importância deste tema tem já um longo historial. Efectivamente, já o primeiro regulamento português para “projectos, provas e vigilância de pontes metálicas”, de 1897, dedicava uma percentagem significativa do seu conteúdo à gestão, conservação, inspecção e provas de carga - tanto estáticas como dinâmicas [3]. Durante o século XX foi-se progressivamente incorporando os aspectos de cálculo, desaparecendo gradualmente os referentes à utilização e conservação das pontes existentes.

## **2. O PROJECTO E A DURABILIDADE DE PONTES**

Apesar da crescente preocupação em prolongar a vida útil das estruturas, podemos afirmar que a durabilidade ainda não é uma preocupação fundamental.

Para a generalidade dos projectistas, o adequado tratamento das questões relacionadas com a durabilidade ainda não é tão acessível como o dos aspectos estruturais. Apesar dos principais mecanismos de degradação estarem hoje em dia razoavelmente identificados, ainda é necessário melhorar os modelos disponíveis para a simulação desses mecanismos (Branco e Brito, 2004). Segundo estes autores os principais passos a efectuar num projecto de durabilidade são: especificação da vida útil; identificação das condições ambientais; definição dos mecanismos de degradação e dos modelos de simulação; definição dos materiais e dos parâmetros de durabilidade; interacção com o projecto estrutural; propor um plano de monitorização e ponderar facilidade de inspecção; evitar os problemas relacionados com a água; ter em conta a facilidade de substituição dos elementos; prevenir a intrusão de animais e apresentar especificações técnicas adequadas.

Ainda que seja do sentido comum que “o barato sai caro” e que comece a haver consciência de que os custos de conservação e de reparação, de qualquer estrutura, podem rapidamente superar os custos de construção, ainda é frequente que se construa a solução com o custo inicial mais baixo. No entanto, seria desejável que na fase de projecto de uma ponte fossem devidamente considerados os diferentes aspectos que condicionam a análise de custos ao longo do ciclo de vida útil: custo do projecto; custo de construção; custo de conservação; custo de reabilitação; custo de utilização; custos associados à vulnerabilidade da estrutura a determinadas acções: sismos; infraescavação; etc. [5].

A pertinência da consideração da vulnerabilidade à infraescavação é evidente se atendermos ao facto de que nas últimas três décadas este fenómeno provocou o colapso de cerca de seiscentas pontes nos EUA e que, de acordo com um levantamento recente [6], nos Estados Unidos cerca de 485.000 pontes têm fundações em leitos de rios. Um número muito significativo destas pontes (cerca de 18.000) podem ser consideradas como tendo um elevado risco de virem a sofrer

infraescavação. Um facto mais alarmante é que se desconhece as características das fundações de cerca de 100.000 pontes.

A durabilidade não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas sim uma função relacionada com o desempenho dos mesmos, sob determinadas condições ambientais. O envelhecimento destes resulta das alterações das propriedades mecânicas, físicas e químicas, tanto na superfície como no seu interior, em grande parte devidas à agressividade do meio ambiente. A ausência desta preocupação na fase de projecto faz com que ao longo da vida útil da estrutura os custos de conservação possam assumir valores muito elevados. A sistematização ou a análise dos mecanismos possíveis de degradação ultrapassa, claramente, o âmbito deste artigo.

### **2.1. Utilização de betões de elevado desempenho**

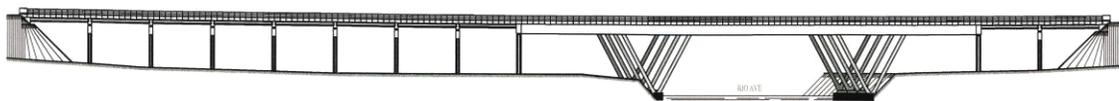
Para melhorar o desempenho dos betões têm sido desenvolvidas inúmeras composições que garantem um bom desempenho estrutural ao longo da vida útil da obra. Quase sempre essas técnicas visam tornar o betão menos permeável, dificultando, assim, a entrada de agentes agressivos. Em geral estas composições baseiam-se na adição de produtos que dão origem a compostos de grande estabilidade e com propriedades aglomerantes, tornando a micro-estrutura bastante mais densa e resultando, assim, num aumento significativo da resistência e durabilidade.

Na ponte sobre o Rio Ave (Figura 1), no sublanço da A11 entre Celeirós e Guimarães, alguns dos pilares de um dos viadutos de acesso foram construídos com betões de composições alternativas. A extensão total da obra, entre eixos dos encontros, é de 280 m, distribuídos da seguinte forma: viaduto de aproximação, com 8 vãos de 16 m, num total de 128 m; zona de atravessamento (ponte) com um desenvolvimento total de 120 m e viaduto de aproximação, com 2 vãos de 16 m, num total de 32 m [7].



**Figura 1 – Ponte sobre o Rio Ave na A11**

Esse estudo teve por objectivo verificar até que ponto a incorporação de qualquer um desses materiais (cinzas volantes, sílica de fumo, metacaulino, látex e inibidor de corrosão) tem influência directa na resistência mecânica e na durabilidade dos referidos betões.



**Figura 2 – Representação esquemática do alçado da ponte e viadutos de acesso**

Dos betões acima referidos foi retirado um elevado número de provetes que, durante a vida útil da estrutura, permitirão realizar ensaios que permitam avaliar, entre outros, os seguintes parâmetros: resistência à compressão; absorção de água por imersão, à pressão atmosférica; permeabilidade ao oxigénio e permeabilidade à água [8]. Atendendo a que a ponte é muito jovem, os resultados entretanto obtidos não parecem, ainda, indicar um claro benefício da incorporação das adições ou adjuvantes utilizados. No entanto, será porventura ainda prematuro formular esta afirmação, devendo-se esperar pelos resultados a idades posteriores.

### **3. INSPECÇÃO DE PONTES**

Dentro dos programas de conservação de pontes, as inspecções assumem uma importância crucial, já que permitem obter os dados necessários para conhecer, em cada momento, o seu estado funcional, resistente e inclusivamente estético. A manutenção e a conservação de pontes baseiam-se, fundamentalmente, nos resultados obtidos nas actividades de inspecção (de inventário, de rotina, principais, especiais e subaquáticas). Recomenda-se que as inspecções sejam realizadas por profissionais competentes e experientes para garantir uma elevada qualidade das avaliações realizadas. Na sua actividade estes deverão estar munidos de manuais de inspecção que incluam uma descrição detalhada das diversas anomalias, referindo as respectivas causas e as consequências que poderão advir da sua existência.

A descrição detalhada de cada uma destas actividades e dos procedimentos que deverão ser seguidos na realização destas inspecções, ou dos equipamentos que deverão ser adoptados, estão para além do âmbito deste artigo, recomendando-se a leitura do documento “Linhas orientadoras de uma política de manutenção, conservação e inspecção de pontes rodoviárias” [9]. No entanto, considera-se oportuno incluir-se aqui uma breve descrição de cada um dos diferentes tipos de inspecções.

#### **3.1. Inventário**

O Inventário de uma ponte é o registo, de uma forma sistemática e organizada, das características dessa ponte que possam interessar à sua manutenção e conservação. Constitui o primeiro passo para a futura realização de todas as actividades de gestão. O inventário deve ser efectuado para todas as pontes integradas no Sistema e para aquelas que entretanto tenham sido objecto de alterações.

Consiste, essencialmente, na localização, identificação e descrição da ponte, de acordo com critérios preestabelecidos, de forma a obter uma base documentada que permita, com eficiência, efectuar todos os procedimentos posteriores de gestão. Assim, o seu conteúdo deve ser estabelecido tendo em conta as características da ponte que são necessárias conhecer para permitir, ou facilitar, a aplicação desses procedimentos.

### **3.2. Inspeções de rotina**

As inspeções de rotina têm uma periodicidade de cerca de doze a quinze meses. O intuito destas inspeções é avaliar o estado de manutenção das obras de arte, o qual traduz a boa ou má execução regular dos trabalhos de manutenção.

O inspector avaliará a qualidade dos trabalhos de manutenção anteriormente realizados, bem como a necessidade de se realizarem trabalhos complementares. Estes trabalhos de manutenção distinguem-se dos de conservação pela sua natureza, extensão e especificidade técnica, pelo que podem ser efectuados por pessoal menos especializado e sem o recurso a equipamentos especiais.

### **3.3. Inspeções Principais**

Uma inspeção principal consiste na observação e registo das condições de funcionamento numa ponte. Neste registo ficam identificadas as anomalias mais graves que comprometem o bom desempenho dos diversos componentes, quer a nível de durabilidade quer ao nível da segurança. Este tipo de inspeção tem, geralmente, uma periodicidade de cinco anos, podendo, no entanto, em casos particulares ser inferior para ter em conta as características de uma determinada ponte.

Tendo presente que este tipo de avaliação assenta na experiência e qualificação técnica dos inspectores, os sistemas de gestão incluem, em geral, um manual de anomalias onde são apresentadas as deficiências detectadas pelas várias equipas de inspeção ao longo dos anos. Nesse manual as anomalias são apresentadas por tipo de obra, sendo para cada uma delas descrito o seu aspecto, a sua localização, as suas causas prováveis, a evolução esperada e os trabalhos de reparação que poderão ser úteis para a reparação dos componentes afectados. Desta forma, com base no conhecimento das diversas anomalias e com base nos critérios de classificação pré-definidos, é possível uniformizar a avaliação por parte dos diversos inspectores.

Em caso de incerteza em relação à causa, extensão ou gravidade da anomalia deve ser solicitada a realização de uma inspeção especial, por forma a efectuar análises técnicas específicas que permitam avaliar com segurança o real estado do componente e propor o trabalho mais aconselhável para a sua correcção. Em situações de má concepção/execução os custos de reparação dos materiais/equipamentos podem exceder os de substituição do respectivo componente.

### **3.4. Inspeções Especiais**

Este tipo de inspeção não tem carácter sistemático ou periódico, porque não responde a uma estratégia estudada com antecedência. Em geral, a inspeção especial é proposta, no seguimento de uma inspeção principal e, mais raramente, de uma inspeção de rotina, quando é verificada uma anomalia cuja causa, extensão ou gravidade se desconhece, ou se conhece com algum grau de incerteza, mas cuja avaliação se considera fundamental para garantir a segurança e/ou durabilidade da estrutura. Poderá ser necessário conhecer o grau de deterioração dos materiais, identificar a sua causa, avaliar o impacte que a anomalia tem, em termos de resistência e de desempenho de determinados componentes, prever a sua evolução, etc.

No âmbito duma inspecção especial poderão ser realizados, entre outros, os seguintes trabalhos: ensaios de carga; recolha de amostras para realização de ensaios químicos e físicos sobre os materiais; medição geométrica de deformações e oscilações; avaliação da camada de recobrimento e do grau de corrosão das armaduras; trabalhos de monitorização (nivelamento, medição de tensões em tirantes e cabos). Dados os elevados custos envolvidos neste tipo de inspecção, é indispensável uma escolha racional dos testes a realizar e dos equipamentos a utilizar. O tipo e número de ensaios deve ser definido em função dos resultados pretendidos, a precisão exigida, a extensão da estrutura, as condicionantes de tempo e a verba disponível, podendo a sua aplicação ser generalizada ou restrita a alguns elementos da estrutura.

As provas de carga estáticas têm por finalidade comprovar que, para condições de carga representativas das acções a que a ponte vai estar submetida, durante a sua vida útil, o comportamento da estrutura ajusta-se às previsões de projecto. A preparação de uma prova de carga estática deverá incluir um estudo prévio e pormenorizado, que permita prever o comportamento da estrutura. Após a prova de carga, deverá ser efectuada uma inspecção à estrutura. Cada posição de carregamento deve ser estudada para que o valor máximo dos momentos flectores não ultrapasse cerca de 70% dos momentos flectores previstos no projecto para as sobrecargas regulamentares. A entrada e retirada dos camiões deve ser sequencial. As medições a efectuar (que poderão incluir cargas, tensões, deformações e deslocamentos) deverão ser realizadas em posição e quantidade suficiente para permitir a correcta avaliação do comportamento da obra. O número de pontos de medida, em cada secção, será função da largura do tabuleiro e do tipo estrutural. Especial atenção deve ser dedicada à análise da grandeza das deformações e deslocamentos residuais.

As provas de carga dinâmicas permitem determinar certos parâmetros que identificam as características intrínsecas da estrutura (frequências de vibração, coeficiente de amortecimento, etc.), a sua resposta a uma excitação externa (acelerações e coeficiente de amplificação dinâmica, entre outros) e detectar anomalias de carácter funcional (movimentos imprevistos nos aparelhos de apoio, incomodidade de utilização por deformabilidade / vibrações excessivas).

### **3.5. Inspeções subaquáticas**

As inspeções subaquáticas deverão ser realizadas com o intervalo máximo de cinco anos. Outra periodicidade de menor intervalo poderá ser definida em face do estado de conservação da obra ou da ocorrência de situações excepcionais indiciando alterações geométricas ou estruturais detectadas noutra tipo de inspecção. Em obras que necessitem uma vigilância especial, pode fixar-se uma periodicidade inferior, como por exemplo nos seguintes casos: fundações muito expostas à acção do escoamento (velocidade elevada, erosões significativas, etc.); alterações significativas do leito do rio (naturais ou devidas a intervenções humanas) em resultado de modificações das condições hidráulicas do curso de água; existência de obras na zona de influência da ponte, que fazem temer uma evolução desfavorável para a estabilidade dos apoios; construção de barragens a montante da ponte.

As inspecções subaquáticas, devido às características de natureza pluridisciplinar, envolvendo a análise estrutural, hidráulica, geotécnica e geológica, devem ser planeadas, programadas, supervisionadas e interpretadas por Engenheiros com experiência e competência comprovadas no domínio das obras de arte e estruturas especiais. Recomenda-se não dissociar a inspecção das fundações submersas da do resto da ponte, já que os danos na estrutura são por vezes imputáveis a anomalias na sua fundação. A existência destas anomalias poderá, eventualmente, ser detectada através dos danos que aparecem na estrutura (caso de assentamentos e deslocamentos). Por esta razão, é necessário que as equipas responsáveis pela observação das fundações tenham conhecimento prévio dos relatórios das inspecções realizadas para o resto da obra e vice-versa.

Em determinadas situações, como por exemplo nas pontes situadas em albufeiras ou em rios com caudais de cheia elevados, deve ser encarada a possibilidade de instalação nos pilares ou encontros de dispositivos que permitam controlar a evolução do comportamento e, em particular, das erosões generalizadas e localizadas no leito, aferir o potencial de erosão e a definição atempada de medidas para a sua mitigação.

#### **4. DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO**

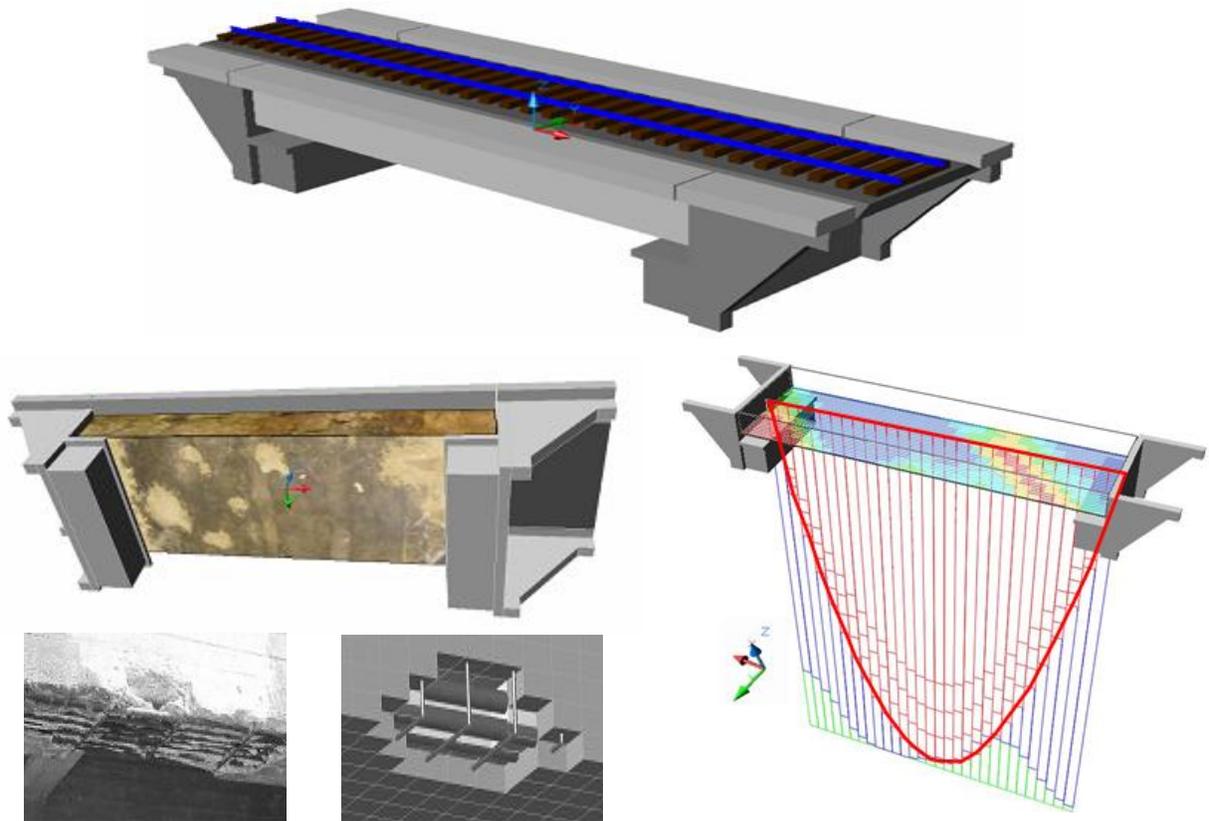
O estado de conservação de uma ponte reflecte a adequabilidade da mesma às vias onde se insere, tanto em termos dos trabalhos de manutenção, conservação e reabilitação, como em termos de funcionalidade da obra. Na avaliação do estado em que se encontra um dado componente, deverá ser tida em conta a natureza e extensão de cada uma das anomalias detectadas e o cenário de evolução previsto para cada anomalia.

Na avaliação do estado de conservação em que se encontra um dado componente, deverá ser tida em conta a natureza e extensão de cada uma das anomalias detectadas e o cenário de evolução previsto para cada anomalia. Por anomalia entende-se qualquer efeito observável e mensurável dos processos de degradação e que afecta o estado de conservação da ponte.

Não é objectivo deste trabalho enunciar todas as anomalias possíveis, analisar quais as presumíveis causas ou apresentar as concomitantes técnicas de reparação. A este respeito pode, por exemplo, ser consultada a referência [10] onde, para estruturas de betão, é apresentada uma lista de anomalias possíveis (noventa e quatro, agrupadas em nove classes), as presumíveis causas (cento e dezassete, agrupadas em nove classes), as técnicas de reparação (sessenta e nove, agrupadas em nove classes) e os métodos de diagnóstico (oitenta e um, agrupados em catorze classes).

No processo de avaliação do estado de conservação é importante a compreensão do comportamento estrutural e funcional da obra de arte, de forma a verificar se as anomalias observadas afectam ou não componentes vitais da mesma.

Como exemplo de uma ferramenta de apoio ao diagnóstico do estado de conservação e da influência na capacidade resistente da redução do diâmetro de armaduras e da perda do betão de recobrimento foi recentemente desenvolvido na Universidade do Minho o programa DAGA (Figura 3) [11].



**Figura 3 – DAGA – “*Graphical Tool for Damage Assessing*”**

A previsão da degradação duma estrutura é um factor de extrema importância na definição do tipo e alcance da reparação a efectuar. Para este efeito, é essencial a existência de um bom modelo de degradação que, com base no conhecimento da situação actual, consiga prever a situação futura ponderando diferentes cenários possíveis, tais como: não se realizar nenhuma intervenção; efectuar-se alguma manutenção preventiva; efectuar-se uma reparação completa. Esta abordagem torna-se mais complexa no caso de se ponderar a aplicação de diferentes cenários de conservação. A confiança no diagnóstico ou prognóstico do estado de conservação pode aumentar se for incorporado o conhecimento adquirido com as inspecções, ou com a monitorização da estrutura. A este respeito merece especial destaque a actualização Bayesiana, por ser uma ferramenta que permite combinar o conhecimento à priori de um especialista com a informação à posteriori conseguida com as observações antes referidas [12].

Os principais objectivos dos ensaios não destrutivos são: a comprovação de dimensões (espessuras, recobrimentos, etc.); a localização e a caracterização de defeitos e de fenómenos de degradação (fendas, vazios, corrosão, carbonatação, teor de cloretos, etc.); a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais (rigidez, resistência, etc.). A título de exemplo, referem-se alguns dos métodos mais correntes: esclerómetro, potencial de corrosão, magnetómetro, ultrasons; radiografias; radar de prospecção geotécnica; emissão acústica; etc. Na interpretação dos

resultados destes ensaios, devem ser tidos em consideração o carácter indirecto e o erro expectável dos valores obtidos.

Em particular a técnica do radar de prospecção geotécnica é extremamente útil para a gestão de pontes e pavimentos facilitando o diagnóstico do estado desses elementos, nomeadamente a determinação de: localização e extensão das zonas de betão delaminadas; localização e extensão de vazios; localização de armaduras e bainhas; medição da espessura da laje e do pavimento. Esta é, também, uma área em que o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho tem uma actividade relevante [13].

#### **4.1. Utilização do radar de prospecção geotécnica**

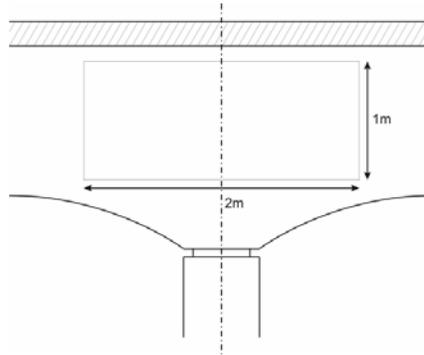
Recentemente o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho foi convidado a proceder à localização exacta das armaduras e bainhas metálicas nas vigas principais da Ponte de Lanheses. A ponte, que atravessa o Rio Lima entre Moreira Geraz do Lima e Lanheses, foi projectada pelo Prof. Edgar Cardoso nos finais dos anos setenta, tendo sido concluída a construção da obra em 1981. A ponte é uma obra com 1218 m de comprimento entre eixos dos apoios nos encontros, com tabuleiro constituído por uma laje vigada pré-esforçada longitudinal e transversalmente (Figura 4). A superestrutura, em betão armado pré-esforçado, é constituída por quatro vigas longitudinais de inércia variável, solidarizadas superiormente pela laje do tabuleiro e transversalmente por carlingas - situadas a terços de vão e sobre os apoios nos pilares. Actualmente, após cerca de 30 anos de serviço, a ponte encontra-se em estado avançado de degradação. As obras de beneficiação e reforço estrutural incluem a construção de novas carlingas (ligadas às vigas principais por intermédio de barras de pré-esforço) e a introdução de pré-esforço longitudinal exterior. Uma vez iniciados os trabalhos de reabilitação, quando se procedia à furação das vigas longitudinais para colocação das barras de pré-esforçadas, foi detectado que a bainhas de pré-esforço estavam cerca de trinta centímetros abaixo da posição prevista no projecto.



**Figura 4 – Ponte de Lanheses**

Os ensaios efectuados neste estudo foram constituídos por aquisições 3D, com um radar de prospecção geotécnica (GPR), em 32 zonas de  $2 \times 1 \text{ m}^2$  na alma das vigas principais (Figura 5) [14]. Esta técnica é semelhante ao radar convencional, excepto que o meio de propagação é

sólido e a zona analisada é muito mais restrita. Em geral as antenas emitem impulsos de cerca de 1 ns de duração que se repetem cerca de 1 milhão de vezes por segundo. Parte da energia é reflectida sempre que se verifica uma mudança ou descontinuidade nas propriedades dielétricas do meio, sendo posteriormente detectada pela antena receptora. Registando a energia reflectida ou transmitida em cada interface pode obter-se uma representação do interior.



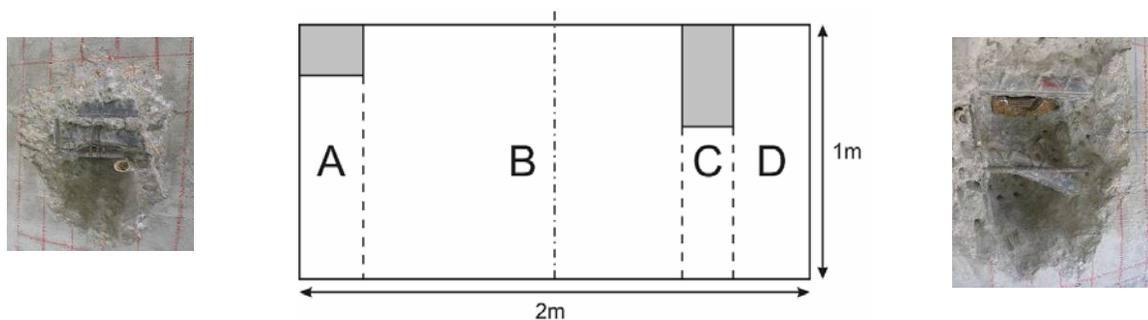
**Figura 5 – Esquema duma das zonas ensaiadas**

As medições foram efectuadas com uma antena de frequência nominal de 1.6 GHz (Figura 6).



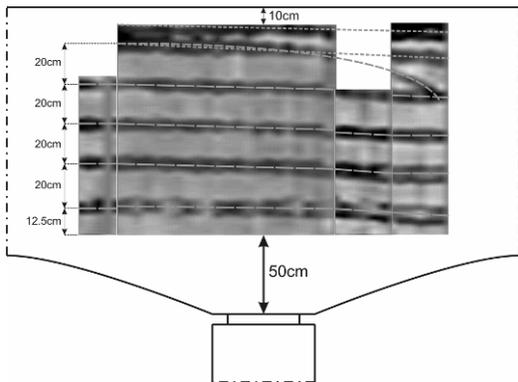
**Figura 6 – Unidade de controlo e medição com a antena de 1.6 GHz no painel da viga 1**

A área referente ao painel P1 (Figura 7) possui duas janelas que foram abertas para averiguação da localização das bainhas de pré-esforço. Por isso, nesse painel, não foi possível efectuar uma aquisição contínua dos sinais, tendo-se procedido à sua divisão em quatro áreas mais pequenas.

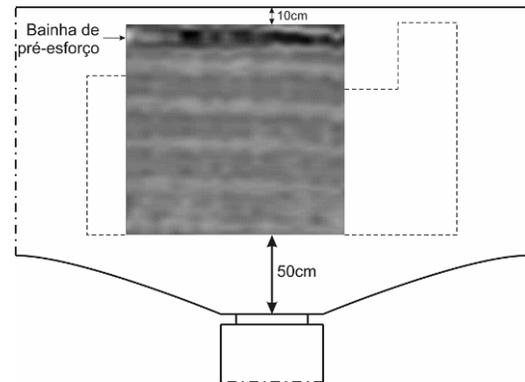


**Figura 7 – Esquema do painel P1. Fotografias das janelas abertas nos painéis A e C**

Todos os dados foram processados de maneira a obter uma visualização mais adequada do conjunto. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 8, que representa uma secção do volume 3D a cerca de 5 cm de profundidade, e que mostra a disposição das armaduras longitudinais. As bainhas metálicas de pré-esforço foram só detectadas no topo da área de investigação, debaixo dos varões de 32 mm de diâmetro (Figura 9).



**Figura 8 – Secção do volume 3D. Indicação das distâncias entre varões**

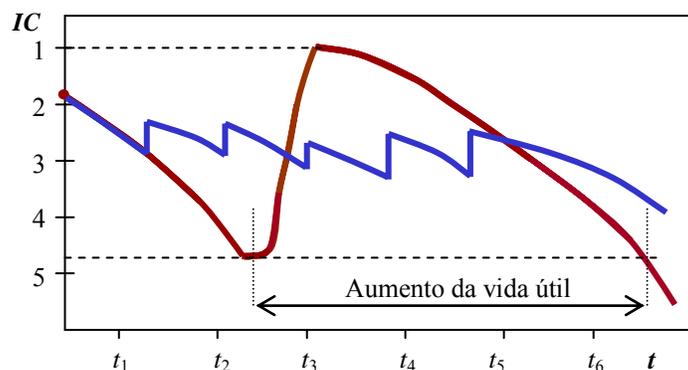


**Figura 9 – Secção do volume 3D. Indicação da bainha de pré-esforço na zona B**

## 5. OPTIMIZAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONSERVAÇÃO

As obras de arte são obras singulares de rede viária. Por isso, retirar uma obra de arte de serviço ou limitar a sobrecarga máxima admissível pressupõe uma grave perturbação para o transporte rodoviário, mesmo sem considerar as consequências catastróficas que poderia acarretar um eventual colapso. Estas razões motivaram, na maioria dos países desenvolvidos, o incremento das medidas tendentes à sua conservação.

Para que ao longo da vida útil uma estrutura mantenha a sua integridade são necessárias intervenções de conservação e de reparação. Como é evidente, para garantir um determinado estado ao fim de um dado período, são possíveis variadíssimas combinações dessas intervenções (Figura 10).



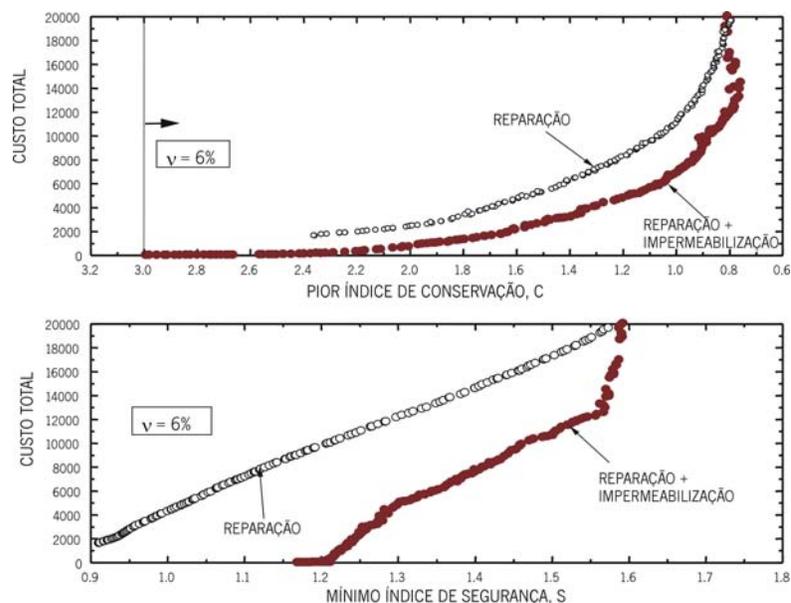
**Figura 10 – Comparação da eficácia de duas estratégias de conservação**

Normalmente o estado de conservação de um componente ou estrutura mede-se com um índice de conservação (*IC*) expresso numa escala discreta, como a que se apresenta na Tabela 1.

**Tabela 1 – Exemplo de escala de índices de conservação**

IC	Significado
1	Sem defeitos ou com pequenos defeitos. Não são necessárias reparações. Apenas conservação de rotina.
2	Alguns defeitos. Reparções logo que conveniente.
3	Defeitos significativos. Reparções urgentes.
4	Defeitos graves. Reparções imediatas.
5	Estado de conservação mau ou mesmo perigoso para a segurança dos utentes. Poderão ser especificadas reparações imediatas.

Os processos de decisão de Markov são as ferramentas usualmente utilizadas nos sistemas de gestão para simular a evolução do índice de conservação de uma ponte. Efectivamente, há mais de 20 anos que esses modelos são usados para simular a degradação de infra-estruturas rodoviárias. Para prever a situação futura estes modelos utilizam matrizes com as probabilidades de transição entre os diferentes estados de conservação. Essas probabilidades costumam ser determinadas a partir da análise estatística de casos semelhantes e, em geral, são constantes durante toda a vida útil. Jiang [15] propôs o processo de decisão de Markov parcialmente observável que, para redução da incerteza das previsões, incorporam a teoria Bayesiana e os resultados das inspeções.



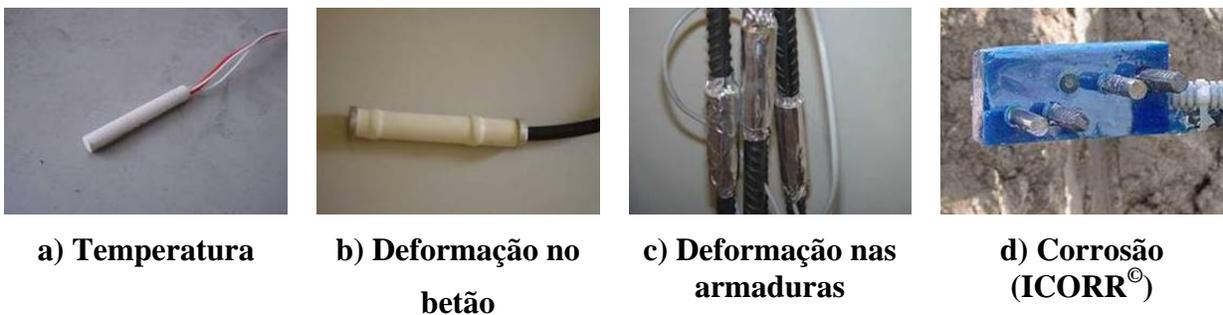
**Figura 11 – Exemplo de resultados obtidos com o algoritmo de optimização [16]**

A informação da relação entre o custo e o efeito das acções de conservação no índice de fiabilidade de estruturas existentes é muito limitada. Como resultado da colaboração entre a Universidade do Minho e a Universidade do Colorado foi, recentemente, proposto um modelo que considera essa interacção e o possível efeito retardador na degradação da estrutura das intervenções de conservação [16]. No modelo de custos considerado admite-se uma relação entre o custo total das intervenções de conservação e o seu efeito na fiabilidade estrutural, bem como o possível efeito retardador na degradação da fiabilidade da estrutura.

Mediante a utilização de algoritmos genéticos, foram seleccionadas as estratégias de conservação que permitem otimizar o estado de conservação, a segurança e o custo ao longo da vida útil [16]. Os resultados obtidos, que a título de exemplo se ilustram na figura 11, para duas diferentes estratégias de conservação, demonstram que: a manutenção preventiva não é suficiente para assegurar a segurança e funcionalidade; o recurso apenas a reabilitação conduz a custos mais elevados e a combinação de ambas conduz a melhores resultados e a um menor custo.

## 6. MONITORIZAÇÃO

Em geral, a manifestação de um mau funcionamento torna-se visível vários anos após se terem desencadeado os mecanismos que o produziram, pelo que seria desejável que as pontes incorporassem sensores que permitissem detectar instantaneamente qualquer problema de mau funcionamento e acompanhar a evolução de diversos parâmetros (mecânicos, físicos ou químicos) ao longo de um dado período.



**Figura 12 – Sensores utilizados na monitorização da ponte sobre o Rio Ave [17]**

Na concepção dum sistema de monitorização deverá haver a preocupação de satisfazer, entre outros, os seguintes requisitos: a máxima compatibilidade dos diferentes sensores e sistemas de aquisição utilizados; a longevidade dos sensores e equipamentos propostos; a qualidade, robustez e fiabilidade do sistema; o máximo rigor e precisão dos resultados; a simplicidade de instalação e de utilização do sistema.

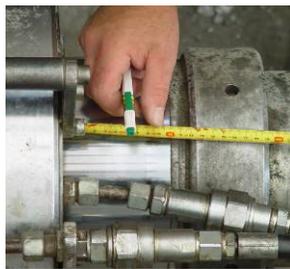
Com um sistema de monitorização será possível: uma avaliação mais rigorosa do estado de conservação; dispor de critérios objectivos para a definição de uma adequada estratégia de conservação, contribuindo para prolongar a vida útil da estrutura; reduzir os custos das actividades de inspecção e conservação, constituindo, ainda, uma garantia adicional da

segurança; aferir a eficácia das operações de reparação e avaliar a necessidade de inspecções ou ensaios adicionais.

O sistema de monitorização utilizado na ponte sobre o Rio Ave, descrita em 2.1, inclui a instrumentação das secções e elementos mais significativos da mesma: pilares do viaduto da margem direita; pilares da ponte; vigas e laje do tabuleiro da ponte e viadutos. Esta monitorização engloba o controlo efectivo da evolução da deformação do betão e das armaduras, a caracterização dos gradientes térmicos e a sua evolução e a monitorização da corrosão das armaduras (Figura 12). No total foram instalados cerca de 300 sensores.



**a) Betonagem da viga**



**b) Aplicação da pós-tensão**



**c) Colocação da viga**



**d) Ensaio de fluência**

**Figura 13 – Fases construtivas em que foram realizados ensaios**

Atendendo a que os sensores em questão foram todos embebidos dentro dos elementos de betão, durante a execução da estrutura foram efectuadas leituras dos valores registados por esses sensores, que permitiram controlar a evolução dos seguintes parâmetros: as temperaturas em diversos pontos da secção de betão e do molde durante a cura do betão de uma das vigas em U; as deformações no betão e nas armaduras durante a aplicação da pós-tensão numa das vigas em U; as deformações em alguns pontos dum pilar em V, durante a colocação da respectiva viga. Para além de todas estas medições, durante a construção da ponte foram, também, realizados diversos ensaios de retracção e fluência em provetes cilíndricos.

O ensaio de prova de carga, coordenado pela Universidade do Minho, permitiu a confirmação do adequado comportamento da estrutura e da eficácia do sistema de monitorização.

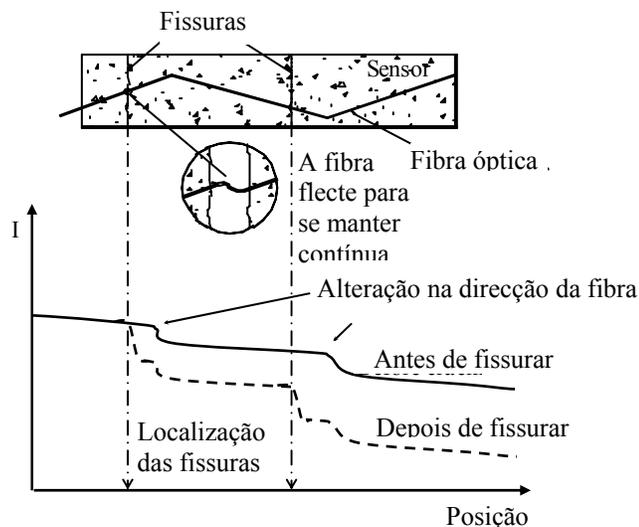


**Figura 14 – Realização do ensaio de prova de carga**

## 6.1. Monitorização da fendilhação com um sensor de fibra óptica intensométrico

O estado de conservação de muitas estruturas de betão poderá ser aferido através da detecção e monitorização da fendilhação. Em tabuleiros de betão a existência de fendas permitirá a penetração de água e cloretos, o que provocará a corrosão das armaduras. A existência de fendas com vários milímetros de abertura será um sintoma de graves anomalias estruturais. Normalmente a detecção e a análise da actividade das fendas é feita com base numa observação visual. Os sensores de fendilhação são, em geral, muito limitados nas suas aplicações e exigem o conhecimento prévio da localização das fendas.

Os sensores de fibra óptica possuem algumas vantagens sobre outros tipos convencionais de sensores, como por exemplo: o não serem interferidos electromagneticamente; a flexibilidade para adaptarem-se a geometrias difíceis; a pouca atenuação por unidade de comprimento; a alta sensibilidade e pouco ruído. Todas estas propriedades das fibras ópticas tornam-nas muito adequadas para distintas aplicações estruturais, tal como foi demonstrado por diversas experiências recentes [18]. A Reflectometria Óptica no Domínio do Tempo (OTDR) é usada em quase todos os sensores intensométricos, para detectar variações da intensidade da luz ao longo da fibra, através da medição temporal dos impulsos recebidos. Desta forma é possível revelar perdas na fibra e localizar essas perdas com boa resolução espacial. Numa fibra um “evento” é tudo o que causa perda ou reflexão, como por exemplo todo o tipo de conectores e defeitos (flexões, fissuras e quebras).



**Figura 15 – Princípio básico de funcionamento do sensor**

Se uma fibra óptica for embebida dentro dum elemento, numa forma em “zig-zag”, nos troços rectilíneos da fibra as perdas de sinal serão muito pequenas e devem-se à absorção e ao espalhamento. Nos pontos de inflexão ocorrem perdas de macro-flexão, que dependem do raio de curvatura [19]. Quando se abre uma fissura, as fibras que intersectem as fendas com uma inclinação diferente de  $90^\circ$  têm de flectir para permanecerem contínuas. Esta perturbação é muito

localizada e, como tal, pode ser considerada uma micro-flexão. Esta resulta numa perda nítida do sinal óptico (Figura 15). Desta forma não é necessário conhecer a localização e com uma única fibra podem ser detectadas e localizadas diversas fissuras.

Numa estrutura real é quase impossível manter a fibra na posição correcta durante a betonagem e vibração. Para contornar esse problema nos últimos anos investigadores da Universidade do Minho e de Hong Kong têm desenvolvido e otimizado uma solução em que a fibra é embebida numa placa polimérica, assegurando-se que esta pode deslizar livremente, por forma a manter-se contínua ao longo da fenda e evitando-se, assim, que se rompa. Na referência [20] é possível encontrar informação detalhada dos resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do sensor, a forma encontrada para condicionar a sensibilidade do mesmo, as conclusões dos estudos realizados para otimizar os processos de fixação do sensor e os resultados dos ensaios de calibração. Recentemente o sensor foi aplicado com êxito à monitorização da fendilhação de diferentes tipos de estruturas ilustradas na figura 16: elementos de betão submetidos a ensaios de tracção e de flexão; elementos de alvenaria submetidos a ensaios de flexão e elementos betuminosos submetidos a ensaios de flexão.



**a) Elementos de betão.**



**b) Paredes de alvenaria.**



**c) Pavimentos betuminosos.**

**Figura 16 – Recentes aplicações do sensor de fibra óptica**

## **7. CONCLUSÕES**

Na última década têm sido intensificados os esforços de investigação e desenvolvimento no vastíssimo campo de conhecimento que inclui a segurança, a inspecção, o diagnóstico, a gestão da conservação e a monitorização de pontes. Neste trabalho, foram apresentados alguns dos desafios que constituem a linha condutora da investigação nesta área na Universidade do Minho, dando especial destaque à monitorização e gestão da conservação.

Entre os temas abordados neste artigo destacam-se os seguintes: a descrição dos diferentes tipos de inspecções; a apresentação de uma ferramenta informática de apoio ao processo de avaliação da influência de algumas anomalias no estado de conservação e segurança de pontes de betão; o resumo dos ensaios realizados com o radar de prospecção geotécnica para identificar a localização exacta das armaduras e bainhas metálicas nas vigas principais da Ponte de Lanheses sobre o Rio Lima; a apresentação de um modelo que permite otimizar o estado de conservação, a segurança e o custo ao longo da vida útil.

No que respeita à monitorização foram descritos os estudos realizados na ponte sobre o Rio Ave e foram apresentados os conceitos básicos referentes a um sensor de fibra óptica para a detecção e monitorização de fendilhação, em que não é necessário conhecer com antecedência a localização das fissuras.

Para a utilização generalizada das metodologias abordadas neste trabalho será necessário banalizar o uso de ferramentas informáticas de apoio ao diagnóstico e prognóstico, bem como consolidar o seu ensino nas disciplinas de pontes.

## REFERÊNCIAS

- [1] - OCDE - “Bridge Management”. Road Transportation Research. Paris, 1992.
- [2] - Hearn, G., Puckett, J., Friedland, I., Everett, T., Hurst, K., Romac, G., Christian, G., Shepard, R., Thompson, T. and Young, R. - “Bridge Preservation and Maintenance in Europe and South Africa”. Report No. FHWA-PL-04-007, International Technology Exchange Program, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, April 2005.
- [3] - MOP - Ministério das Obras Públicas - “Regulamento para projectos, provas e vigilância das pontes metallicas”. Commercio e Industria, Imprensa Nacional. 1897.
- [4] - Branco, F.A. and Brito, J. - “Handbook of Concrete Bridge Management”, American Society of Civil Engineers - ASCE Press. 2004.
- [5] - Hawk, H. - “Bridge life-cycle cost analysis, National Cooperative Highway Research Program”. Report 483, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA. 2003.
- [6] - NCHRP - “1998 Scanning review of European practice for bridge scour and stream instability countermeasures”, National Cooperative Highway Research Program, Research Results Digest No. 241, July. 1999.
- [7] - Cruz, P.J.S. and Wiśniewski, D. F. - “Ave River Bridge - A major precast prestressed concrete U-girder bridge in Portugal”. Journal of the Prestressed Concrete Institute, vol. 49, no. 4, pp. 72-86. 2004.
- [8] - Camões, A., Cruz, P.J.S., Jalali, S. and Cunha, P. - “Durability performance of concrete bridge piers made with metakaolin and latex mixes”. IABMAS’04 - 2nd International Conference on Bridge Maintenance Safety and Management, Kyoto, Japan, October 19-22 (in CD-Rom). 2004.
- [9] - Cruz, P.J.S. - “Linhas orientadoras de uma política de manutenção, conservação e inspecção de pontes rodoviárias”. Universidade do Minho, Guimarães, Novembro. 2003.
- [10] - Brito, J. - “Desenvolvimento de um sistema de gestão de obras de arte em betão”. Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 1992.

- [11] -Maksymowicz M., Bień J., Cruz P. J. S. - “Assessment of load capacity of railway RC slab spans with reinforcement losses”. 2nd International fib Congress, 5-8 June, Naples. 2006b.
- [12] -Ang, A.H-S., and Tang, W.H. - “Probability Concepts in Engineering Planning and Design”. I, Basic Principles, John Wiley & Sons, New York. 1975.
- [13] -Topczewski, L., Fernandes, F.M., Cruz, P.J.S. and Lourenço, P.B. - “Verifying design plans and detecting deficiencies in concrete bridge using GPR”. *Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, July 16-19, Porto, Portugal (in CD-Rom). 2006.
- [14] - Cruz, P.J.S., Topczewski, L. and Fernandes, F.M. - “Relatório da campanha de ensaios na Ponte sobre o rio Lima em Lanheses”. TecMinho, Guimarães. 2006.
- [15] -Jiang, M. - “Partially observable Markov decision processes for structural management policies and design”. Ph. D. Thesis, The Johns Hopkins University, Baltimore, MD, USA. 1995.
- [16] -Neves, L. A. C. - “Life-cycle analysis of bridges considering condition”. PhD Thesis, School of Civil Engineering, University of Minho, February. 2005.
- [17] -Cruz, P.J.S. - “Monitorização da Ponte sobre o Rio Ave, Sublanço da A11 - Celeirós / Guimarães”. Relatório 02-DEC/E-14, Universidade do Minho, Guimarães, Novembro. 2002.
- [18] -Casas, J.R. and Cruz, P.J.S. - “Fiber optic sensors for bridge monitoring, Journal of Bridge Engineering, Bridge Management Systems”, Special Issue, Volume 8, Issue 6, pp. 362-373. 2003.
- [19] -Leung, C. and Elvin, N. - “Micromechanics Based Design of Optical Fiber Crack Sensor”. *Intelligent Civil Engineering Materials and Structures*, edited by Ansari, F., Maji, A., Leung, C., pp. 150-163, ASCE. 1997.
- [20] -Cruz, P.J.,S., Leon, A.D., Leung, C.K.Y. and Nunes, P. - “Mechanical characterization of a fibre optic plate sensor for cracking monitoring”, *Sensors and Materials* (submitted for publication). 2005.