

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE NOVAS CABEÇAS SENSORAS PARA EMBEBER NO BETÃO

H. SOUSA
Est. de Mestrado
LABEST / FEUP
Porto

J. C. MATOS
Est. de Doutoramento
LABEST / FEUP
Porto

H. SILVA
Est. de Mestrado
LABEST / FEUP
Porto

J. L. ESTEVES
Prof. Auxiliar
INEGI / FEUP
Porto

P. S. VIEIRA
Eng. Mecânico
INEGI
Porto

J. A. FIGUEIRAS
Prof. Catedrático
LABEST / FEUP
Porto

SUMÁRIO

O betão, como material estrutural, exhibe um comportamento diferenciado em compressão e tracção. A sua resistência à tracção é cerca de um décimo da resistência à compressão, pelo que fendilha em serviço exibindo um campo de deformações descontínuo. Neste artigo apresenta-se a concepção de uma nova cabeça sensora para embeber no betão cujo principal objectivo é garantir o acompanhamento de ambos os comportamentos. A cabeça sensora foi desenvolvida para acoplar simultaneamente sensores de resistência eléctrica e sensores de rede de Bragg em fibra óptica.

1. ESTADO DA ARTE

Um modo mais eficaz de aplicar sensores em estruturas de betão consiste em utilizar cabeças sensoras que não são mais do que um sistema adequado de interface entre o sensor e o material envolvente. Deste modo os sensores poderão ser embebidos no betão fresco durante a execução da estrutura, permitindo uma medição interna dos parâmetros em causa [1].

Os principais objectivos de uma cabeça sensora são o de oferecer uma robustez adequada contra possíveis danos que possam ocorrer durante a betonagem ou ataques químicos durante o tempo de vida útil da estrutura, de garantir uma deformação igual à do betão envolvente e de proporcionar uma medição de deformação livre por parte do sensor evitando que a rigidez do material constituinte afecte localmente a distribuição de deformações no betão [1].

Segundo um estudo numérico realizado por Lesoille *et al* [2] onde se comparou diferentes cabeças sensoras para embeber no betão, as cabeças sensoras do tipo I, caracterizadas pelas extremidades terem um diâmetro superior ao do corpo cilíndrico, constituídas por um mesmo material são muito sensíveis às condições de aderência cabeça sensora – material envolvente tendo uma resposta assimétrica em tracção e compressão. Este fenómeno é amplificado quando o material em causa é aço.

O autor propõe um outro tipo de cabeças sensoras (tipo W) caracterizadas por uma rugosidade e um diâmetro constante. Estas têm um comportamento simétrico em tracção e compressão sendo possível, no caso de serem constituídas por material compósito, estudar um módulo de elasticidade para o material de modo a que o sensor introduzido na cabeça sensora registre

exactamente aquilo que o betão se deforma. No entanto estas cabeças sensoras só têm um bom funcionamento com sensores de fibra óptica do tipo OTDR, Brillouin ou Interferométricos que integrem a deformação ao longo de toda a cabeça sensora [2].

Nas cabeças sensoras estudadas por Lesoille *et al* os sensores são introduzidos no seu interior. Existe, ainda, um outro tipo de cabeças sensoras onde os sensores são fixos nas extremidades, encontrando-se livres na restante zona. Estas cabeças sensoras são do tipo I, em aço e totalmente aderentes ao material envolvente. Têm a desvantagem de, a longo prazo, o sensor que se encontra sob tensão tender a relaxar diminuindo, deste modo, a sua sensibilidade. Este tipo de cabeça sensora é muito utilizado com sensores de corda vibrante [3].

2. CONCEPÇÃO

Um estudo detalhado foi previamente realizado no sentido de obter uma cabeça sensora apropriada para embeber em estruturas de betão. A forma e composição da mesma foram concebidas de modo a ter uma peça cujas extremidades garantam uma boa fixação ao betão envolvente, e cujo corpo fosse suficientemente deformável para responder ao deslocamento relativo entre extremidades, com o objectivo de poder captar quer deformações em compressão quer em tracção. Concluiu-se, deste modo, que a cabeça sensora deveria ser do tipo I em material compósito, sendo, as suas extremidades, mais adensadas.

Optou-se por colocar no interior do corpo da cabeça sensora um sensor de resistência eléctrica e um sensor de fibra óptica de rede de Bragg. Estes sensores permitirão obter a deformação do material que constitui o corpo da cabeça sensora. Embora a medição da deformação seja local, desde que seja garantida a homogeneidade do corpo da cabeça sensora e a inexistência de aderência entre o corpo e o betão envolvente, garante-se que esta seja representativa da deformação de toda a cabeça sensora. O comportamento da cabeça sensora nas condições descritas assemelha-se ao de uma peça homogénea de secção constante sujeita a um esforço axial.

Uma vantagem destas cabeças sensoras é o facto do sensor a ser instalado não se restringir ao tipo de sensores que integrem a deformação ao longo de toda a cabeça, mais dispendiosos, que é o que acontece com cabeças do tipo W. Pode-se deste modo utilizar, neste tipo de cabeças, sensores de resistência eléctrica ou de fibra óptica de rede de Bragg obtendo-se, deste modo, uma cabeça sensora mais económica.

2.1 Geometria

De acordo com o que se ilustra na Figura 1 a cabeça sensora tem um comprimento total de 56cm. O corpo central é caracterizado por um diâmetro de 20mm e um comprimento de 50cm. As extremidades, por sua vez, têm um diâmetro máximo de 40mm e uma geometria própria que garante uma óptima fixação ao betão envolvente nessa zona.

2.2 Materiais constituintes

Os materiais utilizados na cabeça sensora foram uma resina epóxica reapox 520/526 e fibra de carbono HTA 5131 1600 TEX F24000 TO Tenax Fibres ($E=234$ GPa). Enquanto que o corpo da cabeça é, apenas, constituído por resina, nas suas extremidades utilizou-se uma mistura dessa mesma resina com fibras de carbono (Figura 1).

Realizaram-se ensaios de caracterização mecânica em tracção da resina epóxica do corpo da cabeça sensora assim como do material compósito – fibra de carbono / resina epóxica (percentagem volumica de fibras de 10%) usado nas suas extremidades de acordo com a norma ISO 527 [4].

Foi utilizada uma máquina de ensaios universal de marca INSTRON modelo 4802 para proceder aos respectivos ensaios. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

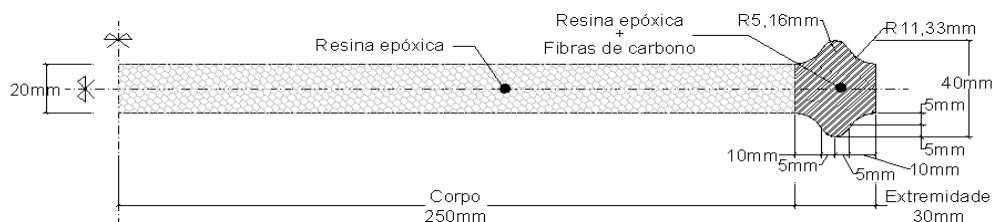


Figura 1: Cabeça sensora (geometria e materiais).

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.

	Módulo de Elasticidade [GPa]	Extensão na Rotura [%]	Tensão de rotura [MPa]
Resina epóxica (corpo da cabeça sensora)	3,28	2,58	7,68
Fibras de carbono / resina epóxica (extremidades da cabeça sensora)	6,08	-	-

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Foi efectuado um estudo paramétrico, através de uma análise numérica em elementos finitos, onde se procurou otimizar as características mecânicas (rigidez) para o desenvolvimento das cabeças sensoras. Para isso considerou-se a cabeça sensora embebida no interior de um prisma de betão com dimensões de 15*15*60cm, sendo este submetido a uma compressão pura. Na modelação da cabeça sensora e do betão foram utilizados elementos axissimétricos de quatro nós. Considerou-se aderência perfeita entre as extremidades da cabeça sensora e o betão envolvente e o restante corpo sensor foi considerado não aderente ao betão envolvente. No referido estudo paramétrico foram testados diferentes módulos de elasticidade para os diferentes materiais, designadamente, o betão, o corpo sensor e as extremidades da cabeça sensora. Na Figura 2 apresenta-se um quarto da malha de elementos finitos onde é possível visualizar a cabeça sensora localizada no interior do prisma, bem como as respectivas dimensões.

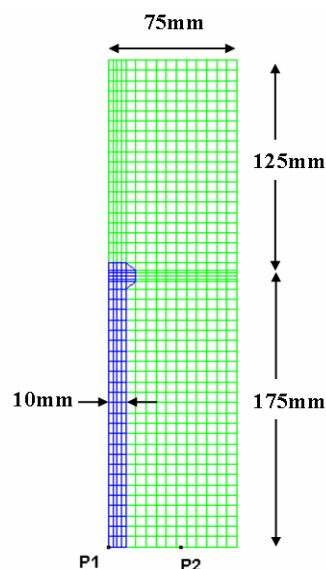


Figura 2: Malha de elementos finitos

Por razões aliadas à concepção e execução do ensaio experimental, na modelação numérica apresentada a cabeça sensora em vez de ter um corpo de 500mm possui 350mm de comprimento.

A Tabela 2 resume os valores dos módulos de elasticidade utilizados em cada análise.

Avaliou-se também o efeito de Poisson, considerando coeficientes de 0.0 e 0.2.

Tabela 2: Módulos de elasticidade utilizados em cada análise.

Análise	A					B				C			D	
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	D1	D2
$E_{\text{betão}}$ (GPa)	40	40	40	40	40	20	20	20	20	40	40	40	20	20
E_{corpo} (GPa)	40	20	10	4	2	20	10	4	2	4	4	4	4	4
$E_{\text{extremidade}}$ (GPa)	40	40	40	40	40	20	20	20	20	40	20	10	20	10

No Gráfico 1 e Tabela 3 apresentam-se os resultados mais representativos do estudo paramétrico efectuado, ilustrando-se para as diferentes análises os valores das extensões obtidas para o betão (ponto P2 – ver Fig. 2) e para a cabeça sensora (ponto P1 – ver Fig. 2), bem como os erros relativos respectivos.

Na Figura 3 ilustra-se a perturbação tipo introduzida pela extremidade da cabeça sensora e a descontinuidade da malha de elementos finitos na zona não aderente.

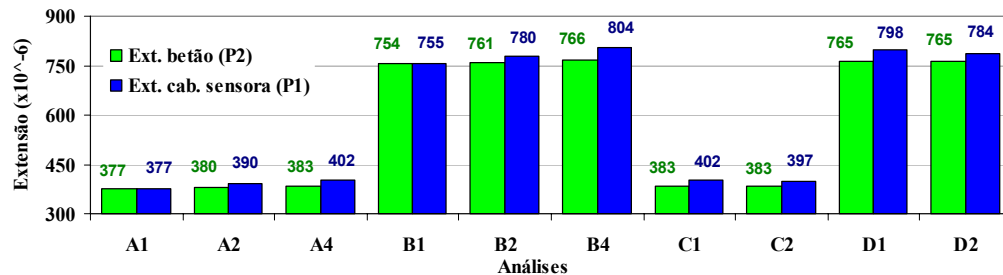


Gráfico 1: Resultados mais significativos da análise considerada na Tabela 2 ($\nu=0.2$).

Com base nos resultados apresentados no Gráfico 1 e Tabela 3 pode-se dizer que:

(i) quanto mais próximo for o módulo de elasticidade da extremidade da cabeça sensora do módulo de elasticidade do betão, maiores deformações são registadas na cabeça sensora (P1) comparativamente ao betão (P2), logo, maior é a diferença entre estas deformações;

(ii) quanto maior for a diferença entre o módulo de elasticidade do betão e o módulo de elasticidade do corpo da cabeça sensora, maior é a diferença entre as deformações registadas na cabeça sensora (P1) e as deformações registadas no betão (P2);

(iii) a diferença entre as deformações registadas na cabeça sensora (P1) e as deformações registadas no betão (P2) dependem apenas da relação relativa entre os diferentes módulos de elasticidade envolvidos, e não dos seus valores absolutos (p. ex. Análise A2 e B2 são semelhantes a menos de um factor);

(iv) constata-se que o coeficiente de Poisson não tem influência significativa.

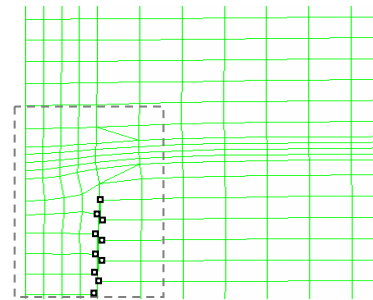


Figura 3: Deformada tipo da zona da extremidade.

Tabela 3: Erro relativo (%) entre a deformação da cabeça sensora e o betão envolvente ($\nu=0.2$).

Análise	A			B			C		D	
	A1	A2	A4	B1	B2	B4	C1	C2	D1	D2
$\frac{\varepsilon_{\text{sensor}}(P1) - \varepsilon_{\text{betão}}(P2)}{\varepsilon_{\text{betão}}(P2)} \times 100$	0.1	2.6	5.0	0.1	2.6	5.0	5.0	3.6	4.4	2.6

4. PROCEDIMENTO DE FABRICO

Para a execução destas cabeças sensoras foi realizado um molde constituído por duas metades em borracha de silicone a partir de um modelo da cabeça sensora à escala real obtido pelo processo de prototipagem rápida (LOME).

O processo de execução das cabeças sensoras a embeber no betão foi faseado do seguinte modo: (i) Execução da primeira metade da cabeça sensora utilizando o molde; (ii) Colocação dos sensores de resistência eléctrica e de fibra óptica de rede de Bragg para medição da deformação (Figura 4); (iii) Aplicação de uma primeira camada de resina sobre os sensores; (iv) Execução da segunda metade da cabeça sensora sobre a primeira, utilizando, novamente, o respectivo molde, fechando-se deste modo a cabeça sensora; (v) Aplicação de uma camada de teflon para diminuir o atrito com o material envolvente na zona do corpo sensor (Figura 4).

No Gráfico 2 apresenta-se o comportamento típico de uma destas cabeças sensoras durante todo o processo construtivo. É possível observar os registos obtidos pelos sensores de deformação e por um sensor de temperatura todos colocados no interior da cabeça. É de verificar que as variações de deformação, registadas por ambos sensores, estão em acordo com a variação de temperatura (temperatura no interior da cabeça – temperatura exterior).



Figura 4: Imagens do processo construtivo da cabeça sensora.

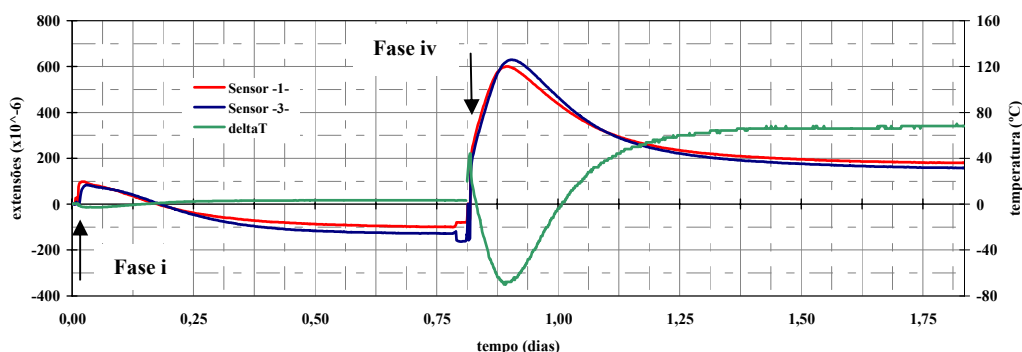


Gráfico 2: Resultados da monitorização do processo construtivo.

5. ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO

5.1. Comportamento à tracção

Todas as cabeças sensoras foram submetidas a ensaios de tracção para calibração. Os resultados obtidos são do tipo do apresentado no Gráfico 3. Pode-se observar que os valores obtidos pelo transdutor de deslocamento, fixo exteriormente à cabeça sensora, e pela resistência eléctrica são próximos o que leva a concluir acerca da existência de uma perfeita colagem ao corpo da cabeça sensora e da homogeneidade das características mecânicas e geométricas da cabeça sensora. Este comportamento foi observado em todos os sensores, daí que as constantes de calibração (valor registado pelo transdutor de deslocamento / valor registado pela resistência eléctrica) tenham valores perto da unidade.

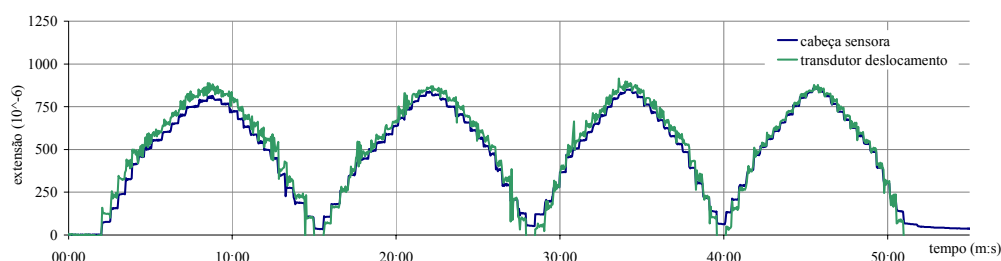


Gráfico 3: Resultado tipo de um ensaio à tracção para calibração de sensores.

5.2. Comportamento à compressão

Realizou-se um ensaio de compressão uniforme a um prisma de betão com 15*15*60cm com uma cabeça sensora embebida. A metodologia do ensaio consistiu na aplicação de uma pré-carga de, aproximadamente, 35KN, correspondendo a um 1/10 da carga de rotura obtida pelos ensaios à rotura sobre o mesmo betão na data do ensaio em questão (28 dias). De seguida foram efectuados cinco ciclos de carga e descarga entre os 35KN e os 340KN. Por fim, o prisma foi descarregado. A sequência do ensaio apresenta-se na Tabela 4.

O objectivo deste ensaio foi avaliar o comportamento da cabeça sensora, colocada no interior do prisma, no que respeita à sua aderência ao betão envolvente. Na Figura 5 é possível observar o ensaio realizado em laboratório.

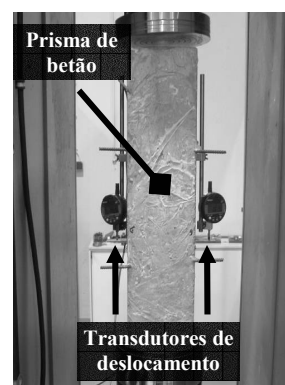


Figura 5: Ensaio de compressão.

Tabela 4: Sequência de carga do ensaio à compressão do prisma.

	Força (KN)	Tensão (MPa)
Pré-carga	0 – 35	0 – 1,5
Cinco ciclos de carga	35 – 340	1,5 – 15
Descarga	35 – 0	1,5 – 0

Com base na modelação apresentada (MEF), e considerando as características mecânicas reais do ensaio, foi possível prever qual seria o valor do módulo de elasticidade do betão do provete fornecido pelo sensor da cabeça sensora (Tensão Aplicada / Deformação registada) e o mesmo fornecido pelos transdutores de deslocamentos [Tensão aplicada / (Deslocamento lido / Deslocamento inicial)].

Seguidamente apresenta-se no Gráfico 4 os resultados do ensaio provenientes da cabeça sensora instalada no interior do prisma e dos transdutores de deslocamentos fixos exteriormente aos prismas (valor médio) como também os resultados numéricos (MEF) respectivos. Verifica-se, da análise do respectivo gráfico, a existência de uma boa correlação entre os resultados provenientes da modelação (MEF) e aqueles provenientes do ensaio.

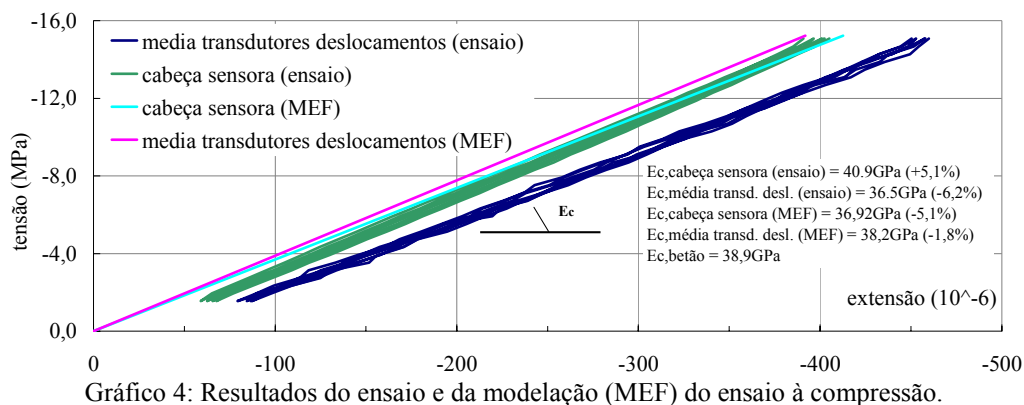


Gráfico 4: Resultados do ensaio e da modelação (MEF) do ensaio à compressão.

Efectuou-se um cálculo do erro relativo percentual $((E_{c,sensor} - E_{c,betão}) / E_{c,betão}) * 100$ tendo-se verificado que o valor fornecido pela cabeça sensora, durante o ensaio, está associado a um erro de 5% inferior ao erro proveniente da média dos transdutores de deslocamentos (6%). Podemos, da análise do Gráfico 4 e dos valores obtidos para o erro relativo percentual, concluir acerca do bom comportamento da cabeça sensora no interior do prisma.

6. CONCLUSÕES

As cabeças sensoras desenvolvidas são do tipo I constituídas por material compósito (resina epóxica), sendo as suas extremidades adensadas com fibra de carbono. Estas apresentam um bom comportamento quando embebidas no betão quer à compressão quer à tracção podendo captar o fenómeno de fendilhação. As cabeças sensoras aqui apresentadas são, também, duráveis pois os sensores nela instalados encontram-se inseridos num material compósito com elevada durabilidade. São, por sua vez, economicamente mais rentáveis pois não necessitam de sensores que integrem a deformação ao longo da cabeça sensora, mais dispendiosos, bastando, para tal, sensores que registem uma deformação localizada, mais económicos (sensores de resistência eléctrica ou de fibra óptica de rede de Bragg).

O processo construtivo adoptado, aqui acompanhado pela monitorização dos sensores eléctricos e de fibra óptica de rede de Bragg, apresenta-se adequado, sendo aceitáveis as deformações residuais provocadas pela cura da resina que constitui a cabeça sensora.

Da modelação numérica efectuada constatou-se que a relação entre o módulo de elasticidade do betão e o módulo de elasticidade do corpo da cabeça sensora deve ser minimizada

(minimização da intrusão provocada pela cabeça sensora), e por outro lado, o módulo de elasticidade das extremidades da cabeça sensora deve ser o mais próximo do módulo de elasticidade do seu corpo pois, deste modo diminuem-se os erros existentes num registo. Este facto é compreensível pois, quanto mais rígida for a extremidade da cabeça sensora (que se encontra aderente ao betão), mais esforço é absorvido pelo seu corpo induzindo, deste modo, maiores deformações sobre o mesmo que se encontra não aderente ao betão envolvente. Um outro factor importante a ter em consideração é a relação de áreas transversais existente entre a cabeça sensora e o prisma de betão, de $1.40 \cdot 10^{-2}$ neste caso concreto. Esta relação é muito pequena e, como tal, a presença do sensor pode ser considerada desprezável.

Os ensaios experimentais aqui apresentados permitiram, de certo modo, concluir acerca das potencialidades destas cabeças sensoras.

Quer na modelação numérica, quer nos ensaios experimentais realizados, os erros observados não ultrapassam em geral os 5%, aceitáveis no domínio da engenharia civil.

No entanto outros ensaios deverão ser realizados com o objectivo de estudar melhor estas cabeças sensoras quando embebidos no betão. Os ensaios para estudo da fluência, da retracção, do comportamento em tracção com e sem fendilhação e da durabilidade, estão a ser neste momento desenvolvidos.

Não são aqui apresentados resultados referentes aos sensores de fibra óptica de rede de Bragg, estando no entanto, as cabeças sensoras apresentadas no presente artigo, instrumentadas com esta tecnologia.

7. AGRADECIMENTOS

As cabeças sensoras aqui apresentadas têm vindo a ser desenvolvidas no âmbito do projecto de investigação “SMARTE – Sistema de gestão de obras de arte em auto-estradas com recurso a monitorização remota baseada em sensores electrónicos e em fibra óptica”, com financiamento da Agência de Inovação, S. A, agradecendo-se, como tal, o respectivo financiamento. Agradece-se, também, à FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo seu suporte financeiro aos bolsheiros envolvidos na realização do presente trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- [1] fib CEB - FIP - "Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures." *State-of-art Report prepared by Task Group 5.1 (Bulletin 22) 2003*, Março 2003.
- [2] Delepine-Lesoille, S.; Merliot, E.; Nobili, M.; Dupont, J. e Caussignac, J.-M. - "Design for a new optical fiber sensor body meant for embedding into concrete." *Structural Health Monitoring 2004*, Munich / Germany, 7-9 Julho 2004, pp. 1185-1192.
- [3] Marecos, J. - "The 40 years of LNEC experience on observation and testing of bridges and special structures" *LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa, Maio 1986, pp. 87-130.
- [4] ISSO / R 527 – “Plastics – Determination of tensile properties” *International Organisation for Standardisation*.