

Comparação do desempenho de sensores de fibra ótica e de dispositivos tradicionais na monitorização de deformações em estruturas de betão



Paulo Bártolo¹



Carlos Serra²



**António Lopes
Batista³**



**Luís Oliveira
Santos⁴**

RESUMO

A monitorização de estruturas em Portugal tem sofrido desenvolvimentos significativos nas últimas décadas, na sequência da valorização das vantagens, a curto e longo prazo, da observação e do controlo da segurança das obras. Com esse fim, têm sido introduzidos no mercado dispositivos que recorrem à tecnologia de fibra ótica para a monitorização de obras de engenharia civil.

O objetivo deste estudo foi a comparação do desempenho de diferentes dispositivos de medição de extensões do betão. Para isso foram moldados provetes de betão de pontes e de betão de barragens, nos quais foram inseridos diferentes tipos de extensómetros disponíveis no mercado. A comparação foi feita através da diferença entre as extensões medidas em cada extensómetro e as extensões calculadas a partir das medições realizadas em transdutores de deslocamento dispostos nas faces durante ensaios de módulo de elasticidade.

Os dispositivos em estudo foram extensómetros de corda vibrante, extensómetros do tipo FSG (resistência elétrica - full-bridge) e extensómetros de fibra ótica, embebidos em betão de pontes e extensómetros do tipo Carlson e extensómetros de fibra ótica, inseridos em betão de barragens.

A utilização de extensómetros de fibra ótica para os dois tipos de betão revelou o bom funcionamento e fiabilidade destes sensores face a diferentes condições, viabilizando uma futura utilização em obra, tanto em pontes como em barragens.

Palavras-chave: monitorização, estruturas de betão, sensores de fibra ótica, sensores tradicionais

¹ Faculdade de Ciência e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. paulo.bartolo@tecniate.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. cserra@lnec.pt

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. a.l.batista@lnec.pt

⁴ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. luís.osantos@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A experiência do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) na utilização de extensómetros tem sido vasta no caso de extensómetros de corda vibrante e extensómetros do tipo Carlson, em pontes e barragens, respetivamente. Apesar das vantagens e comprovado desempenho destes aparelhos ao longo dos anos, os extensómetros de fibra ótica disponíveis no mercado podem constituir alternativas interessantes aos dispositivos tradicionais.

O principal objetivo deste estudo foi a comparação do desempenho de sensores de fibra ótica e de dispositivos tradicionais de medição de extensões do betão. Para isso foram moldados provetes de betão de pontes e de barragens nos quais foram inseridos diferentes tipos de extensómetros. A comparação foi feita através da diferença entre as extensões medidas nos extensómetros de cada provete e as extensões calculadas a partir de transdutores de deslocamento dispostos nas faces durante os ensaios de módulo de elasticidade.

A utilização de extensómetros de fibra ótica nos dois tipos de betão destinou-se a testar o funcionamento e fiabilidade destes sensores face a diferentes condições, com vista a uma eventual utilização em obra, tanto em pontes como em barragens.

Este estudo foi realizado no âmbito dos projetos de investigação “Novas tecnologias de instrumentação de barragens de betão”, do Departamento de Barragens de Betão, e “Novas tecnologias de instrumentação e de gestão da informação em observação de estruturas”, do Departamento de Estruturas, inseridos no Plano de Investigação Programada do LNEC para o quadriénio 2009-2012. Além disso, deu forma a uma dissertação de mestrado apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa [1].

1.2 Medição de extensões em estruturas de betão

A medição de extensões no interior de estruturas de betão requer a utilização de um transdutor embebido que, através da sua deformação, provoque variações de grandezas que possam ser medidas por via elétrica ou ótica.

O princípio de funcionamento de um sensor de corda vibrante baseia-se no comportamento dinâmico de uma corda de aço cuja frequência natural de vibração varia consoante a tensão a que está sujeita [2]. As principais vantagens deste tipo de extensómetro são o seu desempenho e longevidade comprovados em diversas aplicações desenvolvidas pelo LNEC, a estabilidade do sinal medido e o preço competitivo [3]. Como desvantagem, deve referir-se a inadequação deste tipo de dispositivos para aquisição de dados em regime dinâmico, devido ao tempo de excitação e resposta da corda.

O funcionamento dos extensómetros de resistência elétrica baseia-se no facto da resistência de um fio condutor ser alterada em função da deformação a que é sujeito. Foram utilizados extensómetros de resistência elétrica do tipo FSG, cuja a aplicação se pretendia testar.

Por outro lado, foram utilizados também os extensómetros do tipo Carlson cujo funcionamento baseia-se na deformação de dois enrolamentos de aço e na correspondente variação de resistência [4]. Estes extensómetros têm sido amplamente utilizados em barragens de betão, onde se tem comprovado o seu desempenho, robustez e longevidade. No entanto, têm como principal desvantagem o seu elevado custo.

Por fim, o funcionamento dos extensómetros de fibra ótica baseia-se nas alterações das propriedades da luz, nomeadamente as variações de fase, intensidade, comprimento de onda e polarização, quando sujeitas a deformações externas, provocadas por uma alteração física ou ambiental [5]. Existem vários tipos de sensores de fibra ótica, distinguidos em função do seu princípio de funcionamento. No presente trabalho usaram-se os sensores de fibra ótica baseados nas redes de Bragg.

As deformações do betão podem ser quantificadas, à superfície, através da medição da variação da distância entre pontos fixos, utilizando transdutores de deslocamentos. Foi esta técnica usada nos ensaios realizados, para estabelecer um padrão de comparação entre os diferentes extensómetros testados.

2. PLANO DE ENSAIOS

2.1 Tipos de betão e composição

O plano de ensaios considerou a medição de extensões de dois tipos diferentes de betão, um usualmente utilizado em pontes e edifícios que foi designado por betão de pontes e um betão de barragens. Estes betões apresentam características distintas na sua composição e no seu comportamento instantâneo e diferido. As principais diferenças na composição são a máxima dimensão dos agregados, a dosagem de ligante e a consistência (Quadros 1 e 2).

Quadro 1. Composição do betão de pontes

<i>Componentes</i>	<i>Quantidades</i>
Areia fina [kg/m^3]	220
Areia grossa [kg/m^3]	520
Brita 1 [kg/m^3]	540
Brita 2 [kg/m^3]	500
Cimento II/A - L 42,5 R [kg/m^3]	400
Cinzas volantes [kg/m^3]	50
Água [l/m^3]	165
Adjuvante 1 (Pozzolith 390 N) [ml]	1,8
Adjuvante 2 (Glenium Sky 511 R) [ml]	5,4

Quadro 2. Composição do betão de barragens

<i>Componentes</i>	<i>Quantidades</i>
Areia fina [kg/m^3]	294
Areia grossa [kg/m^3]	513
Brita 1 (12/20 mm) [kg/m^3]	467
Brita 2 (16/22 mm) [kg/m^3]	271
Brita 3 (20/40 mm) [kg/m^3]	621
Cimento II/A - L 42,5 R [kg/m^3]	140
Cinzas volantes [kg/m^3]	60
Água [l/m^3]	90
Adjuvante (Sikament 195 R) [ml]	70

No betão de pontes a dosagem de ligante (cimento e cinzas) for de 450kg/m^3 , ao passo que no betão de barragens foi de 200kg/m^3 . Quanto à dosagem de água, no betão de pontes foi usado um valor de 165l/m^3 e no betão de barragens esse valor foi de apenas 90l/m^3 , a que corresponde um betão muito seco.

2.2 Tipo de ensaios

No sentido de estudar o desempenho de cada um dos dispositivos de medição de extensões, os ensaios escolhidos foram os seguintes: i) o ensaio de módulo de elasticidade em compressão, no sentido de avaliar o desempenho na medição de deformações instantâneas; e ii) o ensaio de retração livre, de modo a avaliar o desempenho na medição de deformações que ocorrem ao longo do tempo.

O ensaio de módulo de elasticidade, efetuado segundo a Norma Portuguesa 12390-3 [6], pressupõe a execução de três ciclos completos de carga e descarga entre dois patamares de tensão. As tensões aplicadas corresponderam a um patamar inferior de 0,6 MPa e a um patamar superior igual, aproximadamente, a um terço da resistência à compressão [7].

Os ensaios de determinação das deformações instantâneas decorreram nas idades que, em geral, constituem as referências para a caracterização das propriedades do betão, isto é, aos 7, 28, 90 e 180 dias após moldagem dos provetes. Em correspondência com os ensaios de módulo de elasticidade foram efetuados ensaios de determinação da resistência à compressão em cubos.

Comparação do desempenho de sensores de fibra ótica e de dispositivos tradicionais na monitorização de deformações em estruturas de betão

No sentido de obter alguma representatividade das grandezas envolvidas nos ensaios, e também para testar os diferentes tipos de dispositivos de medição de extensões, foram moldados três provetes prismáticos (20×20×60 cm) para cada tipo de extensómetro embebido e três provetes cúbicos por cada tipo de betão. Moldaram-se assim nove provetes prismáticos (3×3 = 9) com betão de pontes e seis provetes prismáticos com betão de barragens (3×2 = 6), num total de quinze provetes, distribuídos conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3. Distribuição do número de provetes por tipo de extensómetro e por tipo de betão

Tipo de betão	Provetes prismáticos 20×20×60 cm					Total	Provetes cúbicos 15×15×15 cm
	Sensores a considerar						
	Ext. Carlson	Ext. FSG	Ext. corda vibrante	Ext. fibra ótica			
Pontes	-	3	3	3	9	9	
Barragens	3	-	-	3	6	9	
Total	3	3	3	6	15	18	

Em relação aos provetes cúbicos, foram moldados três provetes para ensaios à rotura às idades de 7, 28 e 90 dias, por tipo de betão, perfazendo um total de 18 provetes (3×3 + 3×3 = 18).

Os extensómetros de corda vibrante (CV), do tipo FSG (RE) e de fibra ótica (FO) foram colocados em provetes de betão de pontes (BP) e os extensómetros do tipo Carlson e os extensómetros de fibra ótica (FO) foram instalados em provetes de betão de barragens (BB).

2.3 Execução dos provetes e realização dos ensaios

A execução dos provetes envolveu a preparação dos moldes cúbicos e prismáticos, a montagem dos extensómetros no interior dos provetes prismáticos, a moldagem dos provetes com cada tipo de betão, a cura e a desmoldagem. Os ensaios decorreram no laboratório de betões do Departamento de Materiais do LNEC, às datas previstas, indicadas anteriormente.

A medição das extensões nos extensómetros foi realizada através das respetivas unidades de aquisição automática. No caso dos extensómetros de corda vibrante, do tipo FSG e do tipo Carlson foi utilizada a unidade DT515, da DataTaker, usada correntemente no LNEC na monitorização de pontes. Para a leitura e registo das medições dos extensómetros de fibra ótica foi utilizada a unidade BraggMeter da Fibersensing.

Em complemento aos extensómetros embebidos no interior dos provetes, durante o ensaio foram medidos os deslocamentos sofridos pelos provetes durante os ensaios através de transdutores de deslocamento colocados em faces opostas do provete. A partir das leituras nos transdutores, e considerando um comprimento base de fixação dos transdutores, foi possível obter as extensões nos patamares de ensaio.

Os resultados obtidos nos transdutores constituem o termo de comparação entre os vários extensómetros embebidos. A comparação entre os diferentes dispositivos, betonados em provetes distintos, é feita a partir das diferenças observadas entre as extensões obtidas através dos transdutores e as extensões obtidas através dos extensómetros embebidos.

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

3.1 Resultados obtidos nos provetes de betão de pontes e de barragens

As forças F_i , correspondentes ao patamar inferior de carga, foram estabelecidas, segundo a especificação de ensaio, para uma tensão de compressão de 0,6 MPa. As forças máximas, F_s , foram limitadas a valores menores que o correspondente a 1/3 da tensão de rotura e tendo em consideração as capacidades dos equipamentos de ensaio disponíveis. Os valores das forças e das tensões aplicadas nos ensaios aos provetes de betão de pontes e de barragens são apresentados nos Quadros 4 e 5, respetivamente.

Quadro 4. Forças nos patamares de ensaio dos provetes de betão de pontes

Idade [dias]	Tensão de rotura, f_c [MPa]	$f_c/3$ [MPa]	σ_i [MPa]	F_i [kN]	σ_s [MPa]	F_s [kN]	$\Delta\sigma$ [MPa]
7	55,9	18,6	0,6	24,0	12,5	500,0	11,9
28	63,0	21,0	0,6	24,0	17,9	715,0	17,3
90	68,2	22,7	0,6	24,0	19,3	772,0	18,7
180	-	-	0,6	24,0	19,3	772,0	18,7

Quadro 5. Forças nos patamares de ensaio dos provetes de betão de barragens

Idade [dias]	Tensão de rotura, f_c [MPa]	$f_c/3$ [MPa]	σ_i [MPa]	F_i [kN]	σ_s [MPa]	F_s [kN]	$\Delta\sigma$ [MPa]
7	25,1	8,4	0,6	24,0	8,0	320,0	7,2
28	36,0	12,0	0,6	24,0	10,2	408,0	10,6
90	49,3	16,4	0,6	24,0	10,2	408,0	10,6
180	-	-	0,6	24,0	10,2	408,0	10,6

Os resultados médios obtidos nos extensómetros dos provetes REBP, CVBP e FOBP, em correspondência com os resultados obtidos pelos transdutores (Trans.-REBP, Trans.-CVBP e Trans.-FOBP) para cada uma das idades de ensaio (7, 28, 90 e 180 dias), são apresentados no Quadro 6 e na Fig. 1.

Quadro 6. Extensões médias ($\times 10^{-6}$) nos extensómetros e nos transdutores de deslocamento, nos provetes de betão de pontes

Idade do betão [dias]	7	28	90	180
$\Delta\sigma$ [MPa]	11,9	17,3	18,7	18,7
REBP	388,9	543,2	560,6	556,3
Trans.-REBP	343,9	483,7	510,7	509,0
CVBP	348,1	481,9	504,7	503,0
Trans.-CVBP	336,3	469,2	502,6	503,3
FOBP	360,6	509,0	524,0	525,6
Trans.-FOBP	328,5	451,7	472,9	479,2

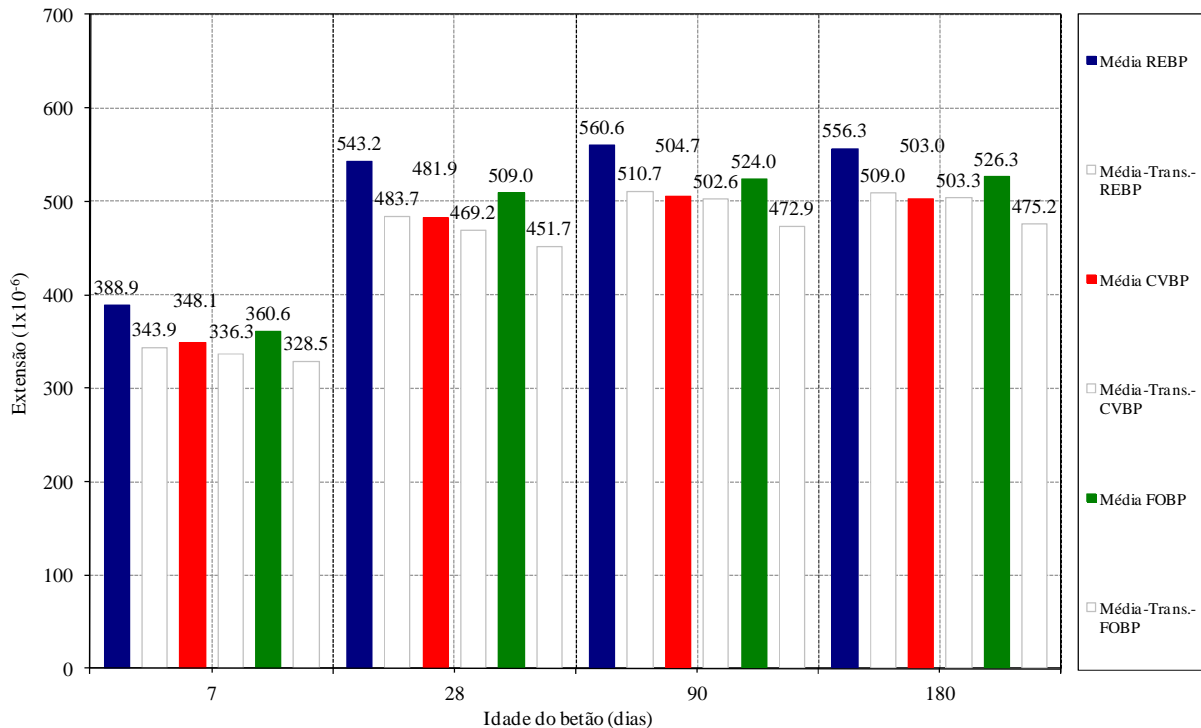


Figura 1. Extensões médias nos extensómetros embecidos e nos transdutores de deslocamento nas faces dos provetes de betão de pontes

Comparação do desempenho de sensores de fibra ótica e de dispositivos tradicionais na monitorização de deformações em estruturas de betão

Os resultados médios dos extensómetros nos provetes FOBB e CABB, incluindo os resultados obtidos pelos transdutores (Trans.-FOBB e Trans.-CABB), para cada uma das idades de ensaio (7, 28, 90 e 180 dias), são apresentados no Quadro 7 e na Fig. 2.

Quadro 7. Extensões médias ($\times 10^{-6}$) nos extensómetros e transdutores de deslocamento, nos provetes betão de barragens

<i>Idade do betão [dias]</i>	<i>7 dias</i>	<i>28 dias</i>	<i>90 dias</i>	<i>180 dias</i>
$\Delta\sigma$ [MPa]	7,2	10,6	10,6	10,6
<i>FOBB</i>	255,7	290,3	268,2	260,9
<i>Trans.-FOBB</i>	286,7	315,4	292,2	278,4
<i>CABB</i>	356,2	336,0	324,2	308,6
<i>Trans.-CABB</i>	344,8	366,1	330,3	318,9

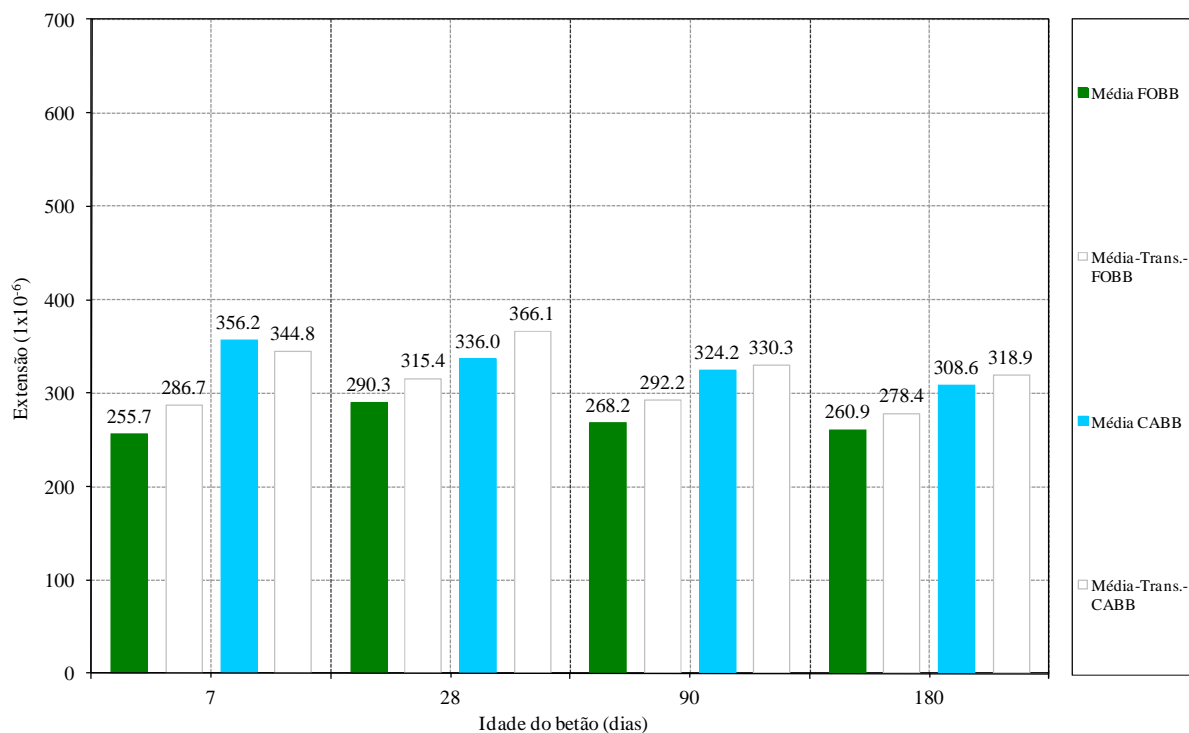


Figura 2. Extensões médias nos extensómetros embecidos e nos transdutores de deslocamento nas faces dos provetes de betão de barragens

3.3 Análise dos resultados

Como referido, a análise dos resultados baseou-se na comparação entre as extensões medidas nos extensómetros embecidos e as extensões médias calculadas nas faces dos provetes a partir das medições realizadas nos transdutores de deslocamento. Assim, na análise dos resultados consideram-se as grandezas definidas nas Eqs. (1) e (2).

$$\Delta\epsilon = \epsilon^{ext.} - \epsilon^{trans.} \quad (1)$$

$$p = \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^{trans.}} \times 100 \quad (2)$$

em que $\epsilon^{ext.}$ são as extensões medidas no extensómetro embecido e $\epsilon^{trans.}$ são as extensões calculadas através da média das leituras dos transdutores colocados nas faces dos provetes.

A opção de tomar os resultados obtidos nos transdutores de deslocamento como referência de comparação permite, apesar do erro associado, obter um termo de comparação entre os valores obtidos nos diferentes extensómetros embecidos.

No Quadro 8 e na Fig. 3 apresentam-se as diferenças em extensão e percentagem, obtidos nos extensómetros e os nos transdutores nos provetes de betão de pontes.

Quadro 8. Diferença entre os valores médios das extensões medidas nos extensómetros embebidos e nos transdutores de deslocamento nas faces, nos ensaios de módulo de elasticidade dos provetes de betão de pontes

	7 dias		28 dias		90 dias		180 dias		Média	
	$\times 10^{-6}$	%	$\times 10^{-6}$	%	$\times 10^{-6}$	%	$\times 10^{-6}$	%	$\times 10^{-6}$	%
REBP	45,0	12%	59,5	11%	49,8	9%	47,3	8%	53,0	11%
CVBP	11,8	3%	12,7	3%	2,1	0%	-0,3	0%	9,1	2%
FOBP	32,2	9%	57,2	11%	51,1	10%	51,0	10%	51,2	11%

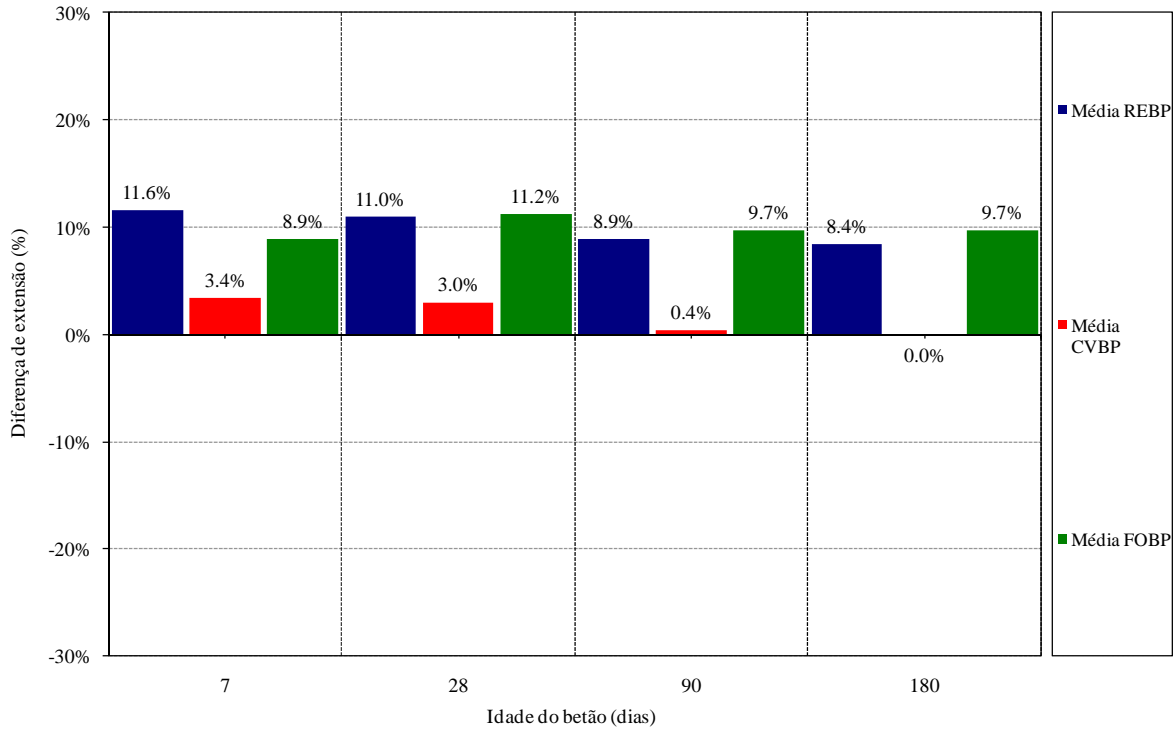


Figura 3. Valores médios percentuais das diferenças das extensões medidas nos extensómetros embebidos e nos transdutores de deslocamento nas faces, nos ensaios de módulo de elasticidade dos provetes de betão de pontes

As diferenças entre os valores médios das extensões medidas nos extensómetros e nos transdutores mostram tendências semelhantes nos extensómetros do tipo FSG e de fibra ótica, com desvios da ordem de 11% e uma melhor concordância nos extensómetros de corda vibrante, com desvios médios de 2%. Estes desvios são sempre positivos, ou seja, todos os extensómetros sobreestimam os valores obtidos pelos transdutores de deslocamento.

Verifica-se também que os desvios médios têm uma tendência decrescente com o aumento da idade dos provetes, quer para os extensómetros do tipo FSG quer para os de corda vibrante. Os resultados dos extensómetros de fibra ótica apresentam desvios médios praticamente constantes ao longo do tempo.

Através dos resultados do ensaio de retração, apresentados na Fig. 4, verifica-se que os resultados obtidos nos extensómetros de fibra ótica apresentam pequenos desvios entre cada provete, para cada uma das idades. Os valores de extensão medidos nos extensómetros FSG são anormalmente elevados face aos registados pelos outros dois tipos de aparelhos, mas têm uma evolução com a forma correspondente ao fenómeno de retração.

Comparação do desempenho de sensores de fibra ótica e de dispositivos tradicionais na monitorização de deformações em estruturas de betão

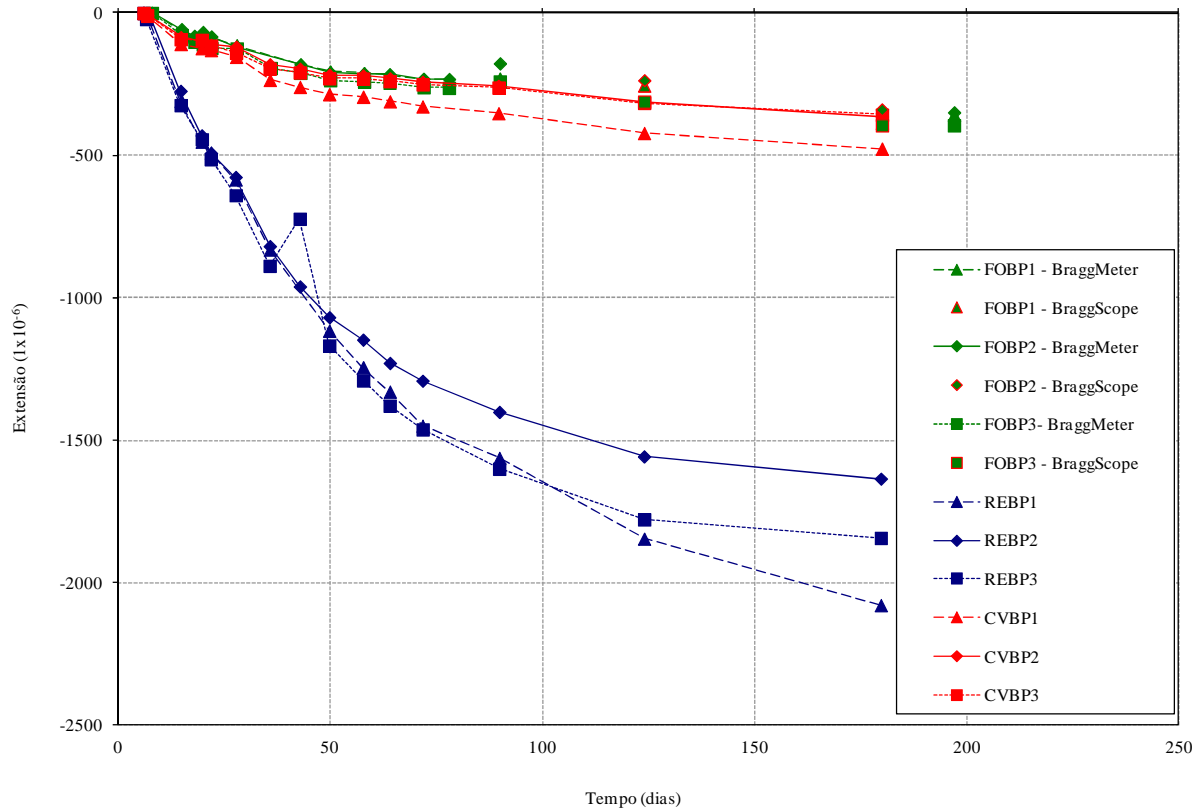


Figura 4. Comparação das extensões de retração medidas nos diferentes tipos de extensómetros, nos provetes de betão de pontes

No Quadro 9 e na Fig. 5 apresentam-se as diferenças em extensão e percentagem, obtidos nos extensómetros e nos transdutores, nos provetes de betão de barragens.

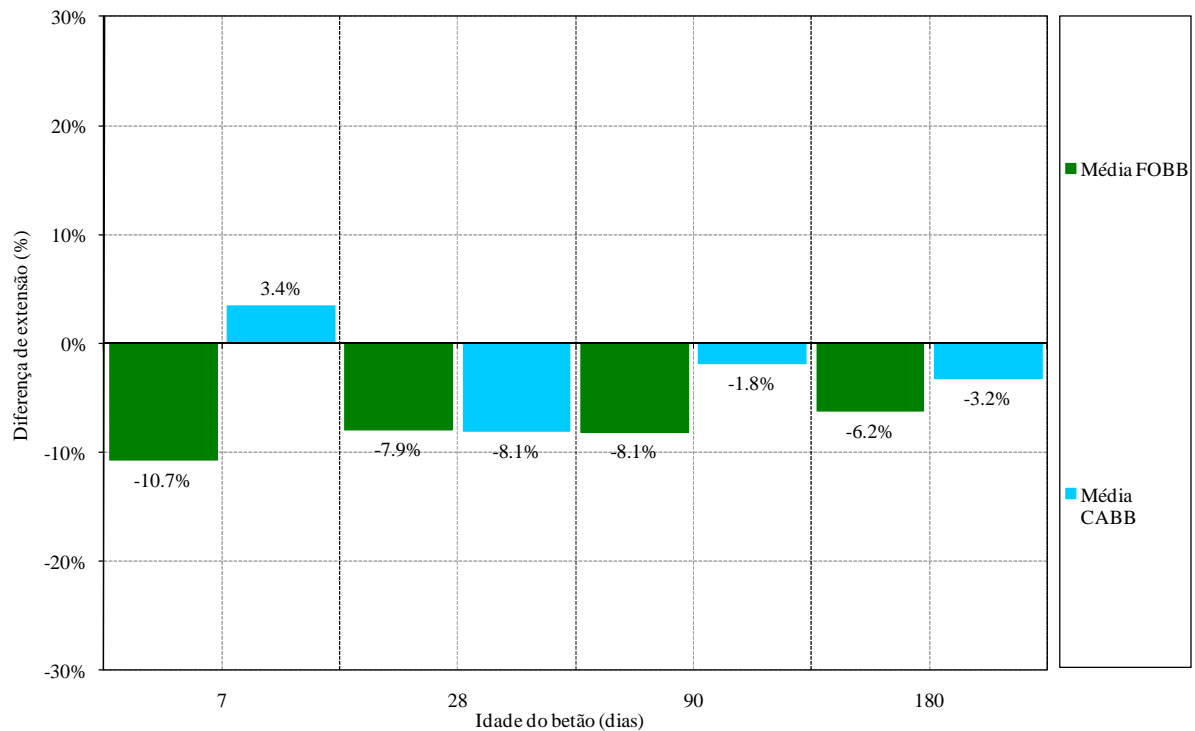


Figura 5. Valores médios percentuais das diferenças das extensões medidas nos extensómetros embecidos e nos transdutores de deslocamento nas faces, nos ensaios de módulo de elasticidade dos provetes de betão de barragens

Quadro 9. Diferença entre os valores médios das extensões medidas nos extensómetros embebidos e nos transdutores de deslocamento nas faces, nos ensaios de módulo de elasticidade dos provetes de betão de barragens

	7 dias		28 dias		90 dias		180 dias		Média	
	$\times 10^{-6}$	%	$\times 10^{-6}$	%	$\times 10^{-6}$	%	$\times 10^{-6}$	%	$\times 10^{-6}$	%
FOBB	-30,9	-11%	-25,1	-8%	-24,0	-8%	-17,5	-6%	-24,4	-8%
CABB	11,4	3%	-30,1	-8%	-6,1	-2%	-10,3	-3%	-8,8	-2,5%

No caso dos provetes de betão de barragens, os resultados mostram desvios médios para os extensómetros do tipo Carlson de -2.5%, inferiores aos desvios médios, de -8%, obtidos com os extensómetros de fibra ótica.

Os desvios médios obtidos com os extensómetros de fibra ótica nos provetes de betão de barragens (8%) são inferiores aos obtidos para os provetes de betão de pontes (11%). Este resultado parece ser contrário ao esperado, dada a maior dimensão dos agregados nos provetes de betão de barragens.

Em relação ao betão de barragens, a dispersão dos valores das extensões de retração, para a mesma idade, é maior que no caso do betão de pontes (Fig. 6), como seria de esperar, devido às características particulares da sua composição.

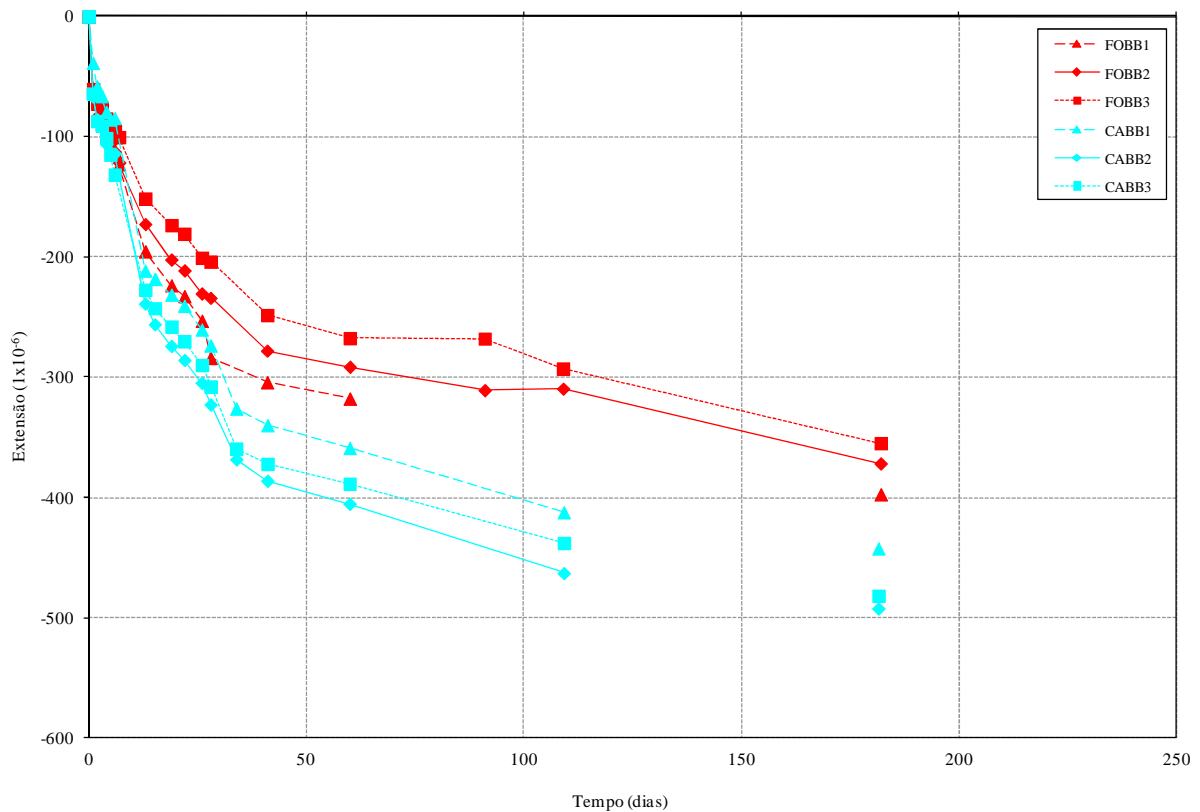


Figura 6. Comparação das extensões de retração medidas nos diferentes tipos de extensómetros, nos provetes de betão de barragens

4. ANÁLISE DE CUSTOS

No Quadro 10 apresentam-se os custos dos extensómetros e das unidades de leitura utilizados para a realização dos ensaios, referentes ao final de 2010.

Quadro 10. Custos dos sensores e das respetivas unidades de leituras, no final de 2010

	<i>Equipamento</i>	<i>Preço unitário (€)</i>
<i>Extensómetros</i>	Corda vibrante	112
	Carlson	600
	Fibra ótica	295
	FSG	215
<i>Unidade de leitura</i>	DT85G	3751
	BraggMeter SS2200	9900
<i>Expansores</i>	DT85G (20 canais)	749
	BraggMeter SS2200(32 canais)	22500

Nas Figs. 7 e 8 apresentam-se os valores dos custos totais e dos custos por extensómetro, em função do número de extensómetros a instalar. No caso dos extensómetros de corda vibrante foram consideradas duas hipóteses, a primeira em que cada canal comporta três extensómetros de corda vibrante e a segunda em que a cada canal corresponde a um único extensómetro (permitindo a medição de temperatura em simultâneo). No caso dos extensómetros do tipo Carlson, foram considerados também dois casos, em que um extensómetro utiliza dois canais para a leitura da extensão (única possibilidade no caso de se utilizar a unidade DT515) e em que um extensómetro corresponde a um canal (possibilidade disponível para a unidade DT85).

Os custos associados à extensometria ótica foram calculados recorrendo a expansores (sem multiplexagem) e à multiplexagem.

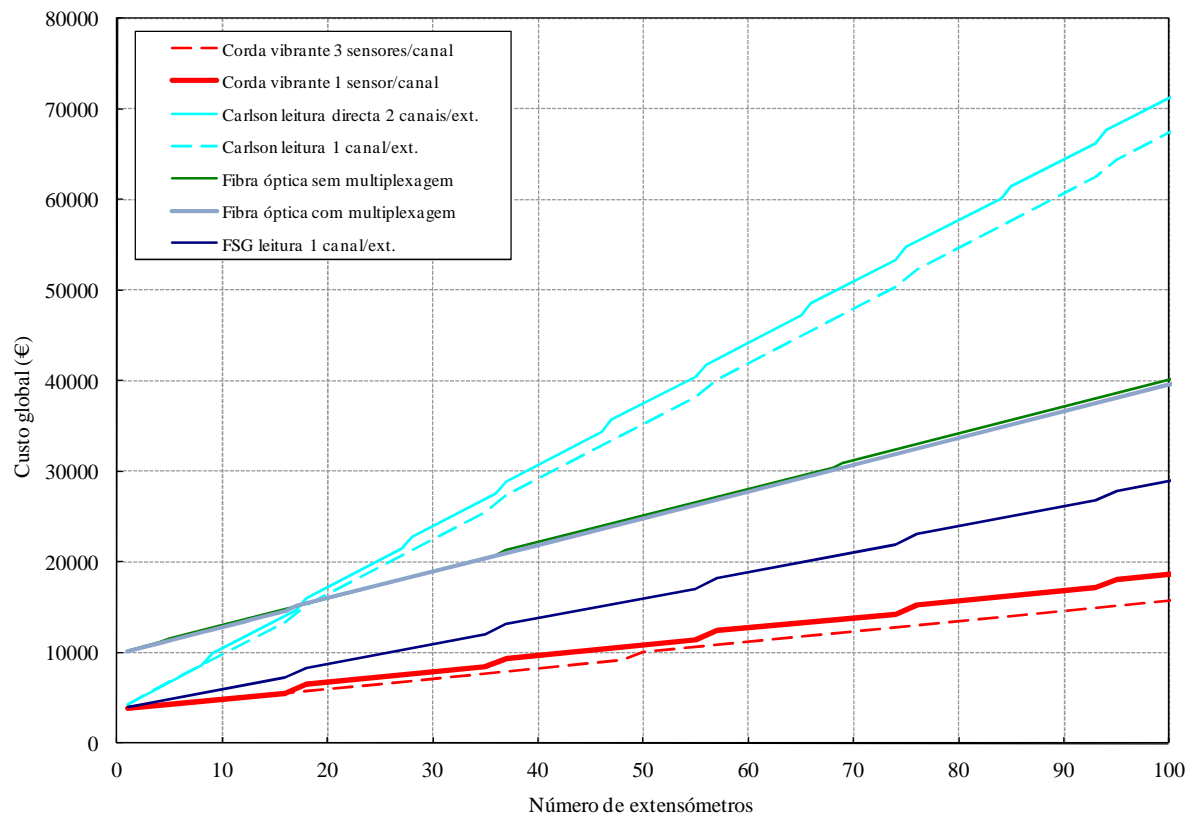


Figura 7. Custo global em função do número total de extensómetros

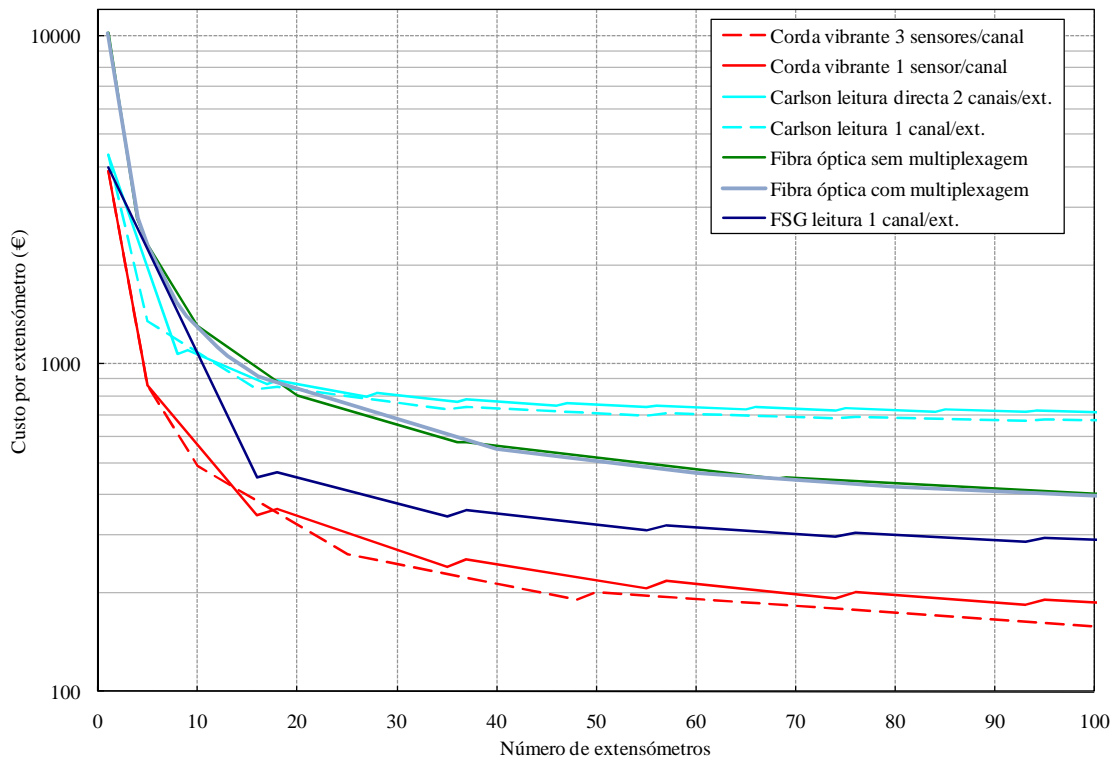


Figura 8. Custo por extensómetro em função do número total de extensómetros

A análise dos custos totais e dos custos por canal de cada tipo de extensómetro mostra que a evolução do custo da unidade de aquisição e dos extensómetros depende das capacidades de expansão de cada unidade, para além do custo unitário de cada equipamento.

Assim, verifica-se que apesar do custo inicial elevado da unidade de leitura dos extensómetros de fibra ótica, este custo dilui-se com a possibilidade de aumentar a capacidade dos canais através de expansores ou através de multiplexagem.

Verifica-se também que o custo associado à utilização dos extensómetros do tipo Carlson é elevado, uma vez que cada extensómetro necessita de um canal para a medição da extensão e cada extensómetro tem um custo superior aos dos outros extensómetros em estudo.

Por outro lado, os extensómetros de corda vibrante são aqueles que apresentam menores custos por canal, caso se utilizem três extensómetros por canal, mas comprometendo-se a medição da temperatura.

5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentam-se os resultados de um estudo de investigação que teve como principal objetivo comparar o desempenho de vários dispositivos de medição de extensões em estruturas de betão, em especial os extensómetros de fibra ótica face aos extensómetros tradicionalmente utilizados. A comparação fez-se através da avaliação da diferença entre as extensões medidas por diferentes tipos de extensómetros embebidos (corda vibrante, do tipo FSG, do tipo Carlson e de fibra ótica) e por transdutores de deslocamento colocados na face dos provetes durante os ensaios de módulo de elasticidade em compressão. Utilizou-se a extensão média registada nas faces dos provetes através de transdutores de deslocamento como medida padrão.

Em termos de resultados médios, para o caso do betão de pontes os extensómetros do tipo FSG e de fibra ótica apresentam desvios na ordem de 10%, sem grandes variações ao longo do tempo, e os extensómetros de corda vibrante apresentam desvios máximos de 6%, sendo que existe, aparentemente, uma ligeira tendência para a diminuição dos desvios para betões mais velhos.

Comparação do desempenho de sensores de fibra ótica e de dispositivos tradicionais na monitorização de deformações em estruturas de betão

No caso do betão de barragens, os desvios são iguais ou inferiores aos obtidos no betão de pontes, entre -8% e -11% para os extensómetros de fibra ótica e entre +3 e -8% para os extensómetros do tipo Carlson.

Conclui-se assim que os desvios médios obtidos encontram-se, para cada um dos tipos de extensómetros, dentro dos limites razoáveis das incertezas associadas à medição de extensões no betão de pontes e de barragens. Verifica-se também o bom desempenho dos extensómetros de fibra ótica face aos restantes tipos de extensómetros.

Em termos de custos, verifica-se uma boa rentabilidade da unidade de leitura dos extensómetros de fibra ótica, em termos do número de extensómetros passíveis de leitura por canal, apesar do maior custo inicial. Os extensómetros de corda vibrante continuam a ser muito devido ao seu reduzido custo unitário e à possibilidade de leitura de dois ou até três extensómetros por canal. Por outro lado, os extensómetros do tipo Carlson têm um custo mais elevado.

6. AGRADECIMENTOS

Foram realizados no Núcleo de Betões do Departamento de Materiais do LNEC a moldagem dos provetes de betão de barragens e todos dos ensaios, pelo que se agradece aos técnicos daquele setor todo o empenho na sua execução.

Agradece-se ainda à Fibersensing todo o apoio prestado durante a realização do trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Bártolo, P., Comparação do desempenho de sensores de fibra ótica e de dispositivos tradicionais na monitorização de deformações em estruturas de betão, Tese de mestrado, Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Caparica, 2011.
- [2] Silva, T., Desenvolvimento de um sensor a corda vibrante para aplicações em engenharia de Reabilitação., *II Congresso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica*, Habana, Cuba, 2001.
- [3] Silveira, P., Batista, A., Schiappa de Azevedo, F., Contributions à la conception des témoins sonores utilisés dans les structures de béton précontraint, *Revue Française de Mécanique* n° 1991-3.
- [4] Fialho, J., *Análise Experimental de Tensões*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1969.
- [5] Félix, C., *Monitorização do Comportamento de Estruturas de Betão*, ISEP, Porto, Portugal, 2002.
- [6] Especificação LNEC EN397. “Determinação do módulo de elasticidade em compressão”, LNEC, Lisboa, 1975.
- [7] NP EN 12390-3. Ensaio do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão de provetes, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2009