



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

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

Paulo Tomé Bártolo

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador Científico: Professor Doutor António Lopes Batista

Co-Orientador Científico: Professor Doutor Luís Oliveira Santos

Lisboa, 2011

“Anyone who has never made a mistake has never tried anything new.”

Albert Einstein

Resumo

A observação do comportamento de estruturas, realizada durante a construção e em serviço, permite a avaliação do seu desempenho com base em valores directamente medidos *in situ* e possibilita a verificação das teorias de comportamento estrutural consideradas na modelação e na análise dessas estruturas. Com efeito, 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 e servir também para obter informação relevante tendo em vista o projecto de futuras construções similares.

A evolução tecnológica que se tem desenvolvido nos últimos anos tem permitido avanços muito significativos no domínio da monitorização do comportamento estrutural, através de um contínuo melhoramento dos sensores existentes, do surgimento de novos sensores, bem como de sistemas de aquisição automática, responsáveis por um salto qualitativo muito importante em termos da qualidade e quantidade da informação disponível. Neste contexto surgiram os sensores de fibra óptica, tecnologia que, embora recente, tem tido uma franca expansão, disponibilizando sensores para a medição de diferentes grandezas.

A introdução de novas tecnologias nos sistemas de monitorização deve ser feita de forma prudente, permitindo os benefícios associados mas sem perder a fiabilidade garantidas por tecnologias com provas dadas em diversos anos de experiência. Neste sentido, a inclusão de novos sensores deve ser precedida de ensaios laboratoriais que atestem tanto quanto possível a qualidade e a fiabilidade desses sensores, e, por outro lado, na utilização em obra deverá haver alguma redundância de sensores comprovados e sensores novos.

É neste âmbito que se insere o presente trabalho, dedicado às primeiras utilizações de uma tecnologia emergente aplicável à monitorização do comportamento de estruturas, a fibra óptica, comparando-a com alguns dos sensores tradicionais, já com várias décadas de uso, procurando um melhor desempenho assim como uma optimização de custo. Neste contexto, propõe-se uma metodologia para a comparação do desempenho da tecnologia da fibra óptica com a dos dispositivos tradicionais para a monitorização de estruturas de betão, focando-se na medição de extensões no interior do betão.

Ao longo do trabalho descrevem-se os ensaios realizados e apresentam-se os resultados obtidos que são comparados e analisados, permitindo extrair algumas conclusões.

- Palavras chave:**
- medição de extensões;
 - pontes;
 - barragens;
 - extensómetros de fibra óptica;
 - extensómetros de corda vibrante;
 - extensómetros tipo Carlson.

Abstract

The observation of structural behaviour, carried out during their construction and service, allows the evaluation of their performance based on data directly measured *in situ* and the verification of structural theories considered in the modelling and analysis of such structures. Indeed, the observation of structural behaviour and the processed data resulting from this observation, beside allowing the control of its security, can be used to improve the quality of the construction itself and to obtain relevant information in order the designing of new similar constructions.

The technological evolution that has been developed in recent years has enabled very significant advances in the field of monitoring the structural behaviour, through a continuous improvement of existing sensors, the emergence of new sensors and automatic acquisition systems, responsible for an improvement in the quality and quantity of available information. In this context came the fiber optic sensors, technology that, although recent, has had a considerable expansion, providing sensors for the measuring of different “grandezas”.

The introduction of new technologies in the monitoring systems must be prudently done, allowing the associated benefits without losing the reliability backed by proven technologies with several years of experience. In this sense, the inclusion of new sensors must be preceded by laboratory tests attesting as much as possible the quality and reliability of such sensors. Then, secondly, the use of these new sensors *in situ* should be done simultaneously with the traditional devices.

The present work is dedicated to the first uses of a new technology applicable to the monitoring of structural behaviour, the fiber optic, comparing it to some of the traditional sensors, already with several decades of use, looking for a better performance as well as a cost optimization. In this context, we propose a methodology for comparing the performance of fiber optic technology with the traditional devices for concrete structures monitoring, focussing on strain measurement inside the concrete.

Along the paper are described the tests and presented the results who are compared and analysed, allowing to draw some conclusions.

- Keywords:**
- measurement of strain;
 - bridges.
 - dams;
 - optical fiber strain meters;
 - vibrating wire strain meters;
 - Carlson type strain meters.

Agradecimentos

A presente dissertação foi realizada no LNEC, ao abrigo do convénio de cooperação existente entre esta instituição e a FCT/UNL, tendo para tal disponibilizado todos os meios necessários para a sua execução.

Ao Prof. António Lopes Batista, investigador do LNEC e professor da FCT/UNL, e ao Eng.º Luís Oliveira Santos, investigador do LNEC, orientadores desta dissertação, agradeço todo o apoio e disponibilidade na sua elaboração.

Ao Eng.º Carlos Serra, do LNEC, que participou no planeamento e na execução dos ensaios, queria agradecer o inexcelável apoio durante a realização do trabalho.

Ao Téc.º Manuel Bernardino, do DM/NB, que supervisionou a realização de todos os ensaios laboratoriais, devo também um agradecimento especial, por todo o empenho e entusiasmo demonstrados.

Aos restantes técnicos experimentadores do DE/NOE, DBB/NO e DM/NB que ajudaram na realização dos trabalhos de campo e em laboratório, agradeço por toda a colaboração dispensada.

Quero também agradecer à empresa Teixeira Duarte, pelo fornecimento gracioso dos agregados graníticos, provenientes do estaleiro de construção do novo descarregador da barragem de Paradela, para o fabrico dos provetes de betão de barragens, e pelo fornecimento de betão do tabuleiro da nova ponte ferroviária sobre o rio Sado em Alcácer do Sal, para a execução dos provetes de betão de pontes.

À Fibersensing, empresa fornecedora dos sensores de fibra óptica utilizados nos provetes, é também devido um agradecimento, por todo o apoio prestado durante a realização dos ensaios.

Quero finalmente manifestar o meu reconhecimento por todo o apoio dos meus familiares e amigos.

Índices do Texto

1. Introdução.....	1
1.1. Justificação e enquadramento	3
1.2. Objectivos.....	4
1.3. Organização da dissertação	5
2. Medição de extensões.....	7
2.1. Generalidades	9
2.2. Tipos de dispositivos para medição de extensões.....	11
2.2.1. Extensometria mecânica – transdutores de deslocamento capacitivos	11
2.2.2. Extensometria acústica – extensómetros de corda vibrante.....	13
2.2.3. Extensometria de resistência eléctrica - extensómetros tipo Carlson de pequena base	16
2.2.4. Extensometria óptica – extensómetros de redes de Bragg.....	18
3. Plano de ensaios	25
3.1. Tipo e composição de betão	27
3.2. Numero e tipo de provetes	28
3.2.1. Provetes cúbicos	28
3.2.2. Provetes prismáticos.....	28
3.3. Construção dos provetes.....	31
3.4. Tipo e condicionamento dos ensaios	36
3.4.1. Ensaio destrutivo para determinação da resistência em compressão.....	36
3.4.2. Ensaio não destrutivo para determinação do módulo de elasticidade.....	38
3.5. Cronograma dos ensaios e plano de leituras	41
3.6. Equipamentos	41
3.7. Determinação das propriedades mecânicas dos betões.....	42
3.7.1. Generalidades	42

3.7.2. Tensão de rotura aos 7, 28 e 90 dias.....	44
3.7.3. Módulo de elasticidade aos 7, 28 e 90 dias	45
3.7.4. Retracção dos provetes.....	48
3.8. Aquisição automática de dados	49
3.8.1. Generalidades	49
3.8.2. Datataker	51
3.8.3. Braggscope	52
4. Apresentação e análise dos resultados dos ensaios.....	53
4.1. Resultados dos ensaios de resistência à compressão	55
4.2. Resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade.....	57
4.2.1. Betão de pontes	57
4.2.2. Betão de barragens	64
4.3. Resultados de leituras para determinação da retracção.....	71
4.3.1. Betão de pontes	71
4.3.2. Betão de barragens	73
4.4. Análise de custos	75
4.5. Considerações finais.....	77
5. Conclusões	79

Índice de Figuras

Figura 2.1: Definição de extensão	9
Figura 2.2: Exemplos de extensómetros para embeber (a), para aplicar à superfície (b) e para armaduras (c)	10
Figura 2.3: Exemplos de configurações de transdutores capacitivos [Coelho, 2005].....	12
Figura 2.4: Transdutor capacitivo de deslocamento da marca “Mitutoyo” montado num provete.....	12
Figura 2.5: Constituição esquemática de um extensómetro de corda vibrante	13
Figura 2.6: Representação esquemática do princípio de funcionamento de um extensómetro de corda vibrante	14
Figura 2.7: Extensómetro de corda vibrante da marca “ <i>Gage technique International Ltd.</i> ” aplicado num molde.....	16
Figura 2.8: Constituição dum extensómetro tipo Carlson	17
Figura 2.9: Extensómetro de resistência eléctrica tipo Carlson da marca “ <i>KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.</i> ” aplicado num molde	18
Figura 2.10: Representação esquemática da composição dum fibra óptica	19
Figura 2.11: Representação conceptual do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg em fibra óptica	20
Figura 2.12: Representação esquemática do efeito da variação de extensão numa rede de Bragg [www.sensormag.com]	21
Figura 2.13: Multiplexagem por divisão de comprimento de onda	22
Figura 2.14: Extensómetro de fibra óptica da marca “ <i>FiberSensing, Sistemas Avançados de Monitorização, S.A.</i> ” aplicado num molde	23
Figura 3.1: Esquema ilustrativo do número de provetes cúbicos	28
Figura 3.2: Figura ilustrativa das possibilidades estudadas para colocação dos sensores no interior dos provetes	29
Figura 3.3: Esquema ilustrativo do número de provetes prismáticos de betão de pontes (a) e de barragens (b)	29
Figura 3.4: Molde metálico utilizado na construção dos provetes prismáticos	31

Figura 3.5: Moldes plásticos (a) e metálicos (b) utilizados nos provetes cúbicos.	31
Figura 3.6: Posicionamento dos vários tipos de extensómetros nos moldes	32
Figura 3.7: Moldagem de provetes com betão de pontes	32
Figura 3.8: Fabrico do betão de barragens utilizado para moldagem dos provetes	33
Figura 3.9: Moldagem dos provetes de betão de pontes em estaleiro.....	33
Figura 3.10: Moldagem dos provetes de betão de barragens em laboratório.....	34
Figura 3.11: Avaliação da consistência do betão de barragens com cone de Abrams	35
Figura 3.12: Desmoldagem e cura dos provetes prismáticos.....	35
Figura 3.13: Prensa para pesagem (a) e ensaio destrutivo (b) de provetes	36
Figura 3.14: Aspecto das superfícies de rotura dos provetes cúbicos.....	37
Figura 3.15: Prensa para ensaio de módulo de elasticidade.....	39
Figura 3.16: Deflectómetro aplicado numa das faces do provete	40
Figura 3.17: Sistema de aquisição para leitura do sensor embebido no provete.....	40
Figura 3.18: Diagrama tensão-deformação do betão até à rotura	44
Figura 3.19: Diagrama representativo dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade – leitura através dum sensor embebido	45
Figura 3.20: Diagrama representativo dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade – leitura através do transdutor de superfície.....	46
Figura 3.21: Diagrama de retracção do betão (valores de extensão em compressão).....	49
Figura 3.22: Esquema funcional de um sistema de aquisição automático baseado num computador pessoal [Serrano <i>et. al.</i> , 2004].....	50
Figura 3.23: Equipamento <i>dataTaker</i> DT515.....	51
Figura 3.24: Equipamento <i>BraggSCOPE</i> portátil.....	52

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1: Evolução da tensão média de rotura em função do tempo	56
Gráfico 4.2: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de pontes, nos ensaios realizados aos 7 dias.....	59
Gráfico 4.3: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de pontes, nos ensaios realizados aos 28 dias.....	59
Gráfico 4.4: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de pontes, nos ensaios realizados aos 90 dias.....	60
Gráfico 4.5: Representação gráfica das extensões registadas num patamar de carga constante, no caso de um sensor de corda vibrante.....	62
Gráfico 4.6: Representação gráfica das extensões registadas num patamar de carga constante, no caso de um sensor de fibra óptica	62
Gráfico 4.7: Representação gráfica da evolução do módulo de elasticidade calculada com os resultados obtidos nos sensores embebidos e nos deflectómetros, para os provetes de betão de pontes.....	63
Gráfico 4.8: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de barragens, nos ensaios realizados aos 7 dias.....	66
Gráfico 4.9: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de barragens, nos ensaios realizados aos 28 dias.....	66
Gráfico 4.10: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de barragens, nos ensaios realizados aos 90 dias.....	67
Gráfico 4.11: Representação gráfica das extensões registadas num patamar de carga constante, no caso de um sensor de resistência eléctrica tipo Carlson.....	69
Gráfico 4.12: Representação gráfica das extensões registadas num patamar de carga constante, no caso de um sensor de fibra óptica	69
Gráfico 4.13: Representação gráfica da evolução do módulo de elasticidade calculada com os resultados obtidos nos sensores embebidos e nos deflectómetros, para provetes de betão de barragens.....	70
Gráfico 4.14: Evolução da extensão da retracção nos provetes de betão de pontes com sensores de corda vibrante	71

Gráfico 4.15: Evolução da extensão da retracção nos provetes de betão de pontes com sensores fibra óptica	72
Gráfico 4.16: Extensões médias de retracção medidas nos provetes de betão de pontes e calculadas pelo EC2	73
Gráfico 4.17: Evolução da extensão da retracção nos provetes de betão de barragens com sensores de resistência eléctrica tipo Carlson	74
Gráfico 4.18: Evolução da extensão da retracção nos provetes de betão de barragens com sensores de fibra óptica	74
Gráfico 4.19: Extensões médias de retracção medidas nos provetes de betão de barragens e calculadas pelo EC2	75
Gráfico 4.20: Representação gráfica do preço por canal da unidade de leitura	76

Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Composição dos betões.	27
Tabela 3.2: Designação dos provetes prismáticos	30
Tabela 3.3: Datas de realização dos ensaios	41
Tabela 3.4: Extensómetros e unidades de leitura utilizados no betão de pontes e de barragens.....	42
Tabela 3.5: Comparação dos dois tipos de medição efectuados nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade	47
Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cubos de betão de pontes	55
Tabela 4.2: Resultados do dos ensaios de resistência à compressão dos cubos de betão de barragens.....	55
Tabela 4.3: Critérios de identidade para a resistência a compressão	56
Tabela 4.4: Valores de tensões máximas e mínimas aplicadas nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade às diferentes idades, betão de pontes.....	57
Tabela 4.5: Valores de extensão para o betão de pontes	58
Tabela 4.6: Diferenças, em percentagem, das extensões medidas pelos sensores e pelos deflectómetros, nos provetes de betão de pontes	61
Tabela 4.7: Valores do módulo de elasticidade – betão de pontes	63
Tabela 4.8: Valores de tensões máximas e mínimas aplicadas nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade às diferentes idades, betão de barragens.....	64
Tabela 4.9: Valores de extensão para o betão de barragens	65
Tabela 4.10: Diferenças, em percentagem, das extensões medidas plos sensores e pelos deflectómetros, nos provetes de betão de barragens	68
Tabela 4.11: Valores do módulo de elasticidade – betão de barragens	70
Tabela 4.12: Preços unitários dos sensores e das respectivas unidades de leituras, em 2011.....	76
Tabela 4.13: Comparação do desempenho dos sensores	78

Índice de Anexos

Anexo A: Fichas técnicas dos sensores utilizados

Anexo B: Boletins dos ensaios realizados para determinação do módulo de elasticidade

Anexo C: Resultados dos ensaios realizados para determinação do módulo de elasticidade

Lista de Siglas

DBB - Departamento de Barragens de Betão

DE - Departamento de Estruturas

DM - Departamento de Materiais

FBG - Fiber Bragg Grating

FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NB - Núcleo de Betões

NOE - Núcleo de Observação de Estruturas

SHM - Structural Health Monitoring

TDM - Time Division Multiplexing

UNL - Universidade Nova de Lisboa

WDM - Wavelength Division Multiplexing

Lista de Símbolos

A - Área entre placas

C - Capacidade

C_1 - Custo de leitura de um sensor sem unidade expansora

C_2 - Custo de leitura de um sensor com unidade expansora

C_{sensor} - Custo do sensor

$C_{unidade\ aquisição}$ - Custo da unidade de aquisição

$C_{expansor}$ - Custo da unidade expansora

n_{canais} - Número de canais disponíveis

D_t - Constante inicial do sensor de resistência eléctrica tipo Carlson

E - Módulo de elasticidade ao aço da corda

E_c - Módulo de elasticidade em compressão

E_{cs} - Módulo de elasticidade secante do betão

F - Força máxima

GF - Coeficiente dependente das características da fibra óptica

K - Rigidez

L - Comprimento inicial

ΔL - Variação de comprimento

R - Resistência do fio

R_0 - Resistência de calibração do sensor de resistência eléctrica tipo Carlson

RR_0 - Razão de resistências de calibração do sensor de resistência eléctrica tipo Carlson

T - Temperatura

T_0 - Temperatura de calibração do sensor de resistência eléctrica tipo Carlson

ΔT - Variação de temperatura

e_1 e e_2 - Constantes iniciais do sensor de resistência eléctrica tipo Carlson

f - Frequência de vibração

f_c - Tensão de rotura em compressão

f_{cm} - Tensão média de rotura em compressão obtida em cubos

f_{ck} - Valor característico de tensão de rotura obtida em cubos

l - Comprimento da corda

l_g - Distância entre placas

m - Massa da corda

n_{efc} - Índice efectivo do modo guiado

\mathcal{E} - Extensão

\mathcal{E}_c - Extensão do betão quando sujeito à compressão

\mathcal{E}_{ca} - Extensão devida à retracção autogénea

\mathcal{E}_{cd} - Extensão devida à retracção por secagem

\mathcal{E}_{cs} - Extensão total por retracção

\mathcal{E}_{c_0} - Extensão inicial do betão quando sujeito à compressão

\mathcal{E}_f - Extensão final

\mathcal{E}_i - Extensão inicial

$\Delta\mathcal{E}$ - Variação de extensão

ϵ_0 - Permissividade do ar

$K \cdot \epsilon_0$ - Permissividade de um dado material

$\mu\mathcal{E}$ - *microstrain*

λ_0 - Comprimento de onda de ressonância do espectro em reflexão

Λ - Período de modelação da rede de Bragg

β - Coeficiente dependente das características da fibra óptica

δ - Deformação

σ - Tensão a que a corda está sujeita

XX

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificação e enquadramento

O desenvolvimento socioeconómico e a explosão demográfica que se tem verificado nas últimas décadas obrigaram à construção de novas estruturas de grande dimensão, grande complexidade e de grande exigência técnica, em suma, novos desafios de engenharia.

Actualmente, o objectivo é o desenvolvimento de estruturas inteligentes equiparáveis ao corpo humano, com a capacidade de “sentir”, actuar e responder de uma forma controlada e predeterminada a um estímulo, revertendo ao seu estado inicial aquando da remoção do mesmo [Vardan, 2000]. O “sentir” das estruturas é já uma realidade graças à existência de sensores que se encontram incorporados nas mesmas, com a capacidade de traduzir e transmitir os efeitos gerados no seu interior.

Neste contexto, a observação e análise do comportamento estrutural é uma actividade com crescente intensidade a nível nacional e internacional [Marecos, 2007] permitindo a detecção e previsão de eventuais anomalias, alertando, atempadamente, sobre possíveis falhas que possam provocar a interrupção de serviço ou, em última análise, grandes catástrofes [Alves, 2007].

A evolução tecnológica tem permitido o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos sistemas denominados em língua inglesa por *Structural Health Monitoring*. Estes sistemas consistem na implementação de dispositivos e técnicas de inspecção, monitorização e detecção de danos, que se tornam parte integrante da estrutura [Rodellar, 2009]. Assim sendo, poderá obter-se uma melhor eficiência dos materiais, uma maior segurança, fiabilidade e economia.

A inovação reflecte-se na tecnologia dos sensores utilizados. Em contraste com os sensores tradicionais, cujos princípios de funcionamento são, em geral, baseados na utilização de princípios mecânicos e circuitos eléctricos, está a ser desenvolvida uma nova geração de instrumentos que utilizam as propriedades da luz para o seu funcionamento, denominados sensores de fibra óptica.

1.2. Objectivos

Esta dissertação tem como principal objectivo a comparação do desempenho de extensómetros tradicionais e de extensómetros de fibra óptica na monitorização de deformações de estruturas de betão.

Apresenta-se de forma sucinta, em primeiro lugar, uma revisão dos princípios de funcionamento dos vários tipos de sensores.

De seguida é estabelecida uma metodologia de comparação do desempenho dos vários tipos de sensores, considerando ensaios de deformabilidade em compressão de provetes prismáticos de betão nos quais foram inseridos os sensores.

Os resultados obtidos nos ensaios permitiram tirar um conjunto de conclusões relativamente à adequação dos diferentes tipos de sensores na monitorização de estruturas de betão de pontes e de barragens.

1.3. Organização da dissertação

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, sendo o primeiro a presente introdução.

No capítulo 2 são apresentados os vários tipos de extensómetros utilizados correntemente para a monitorização de deformações de estruturas de betão em Portugal, nomeadamente os sensores de corda vibrante, os sensores de resistência eléctrica tipo Carlson e, finalmente, os sensores de fibra óptica como alternativa.

No capítulo 3 são descritos os ensaios laboratoriais realizados no âmbito do presente trabalho, com o objectivo de comparar o desempenho dos diferentes sensores.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios descritos no capítulo 3, seguindo-se uma análise comparativa dos mesmos

Finalmente, o capítulo 5 é constituído pelas conclusões do trabalho desenvolvido, incluindo uma síntese dos principais resultados alcançados, e por algumas sugestões para desenvolvimentos futuros nesta área de investigação.

2. MEDIÇÃO DE EXTENSÕES

2.1. Generalidades

A extensão é uma grandeza adimensional, definida como a variação de comprimento por unidade de comprimento. Em geral, obtém-se medindo a variação de comprimento entre dois pontos em relação ao seu comprimento inicial.

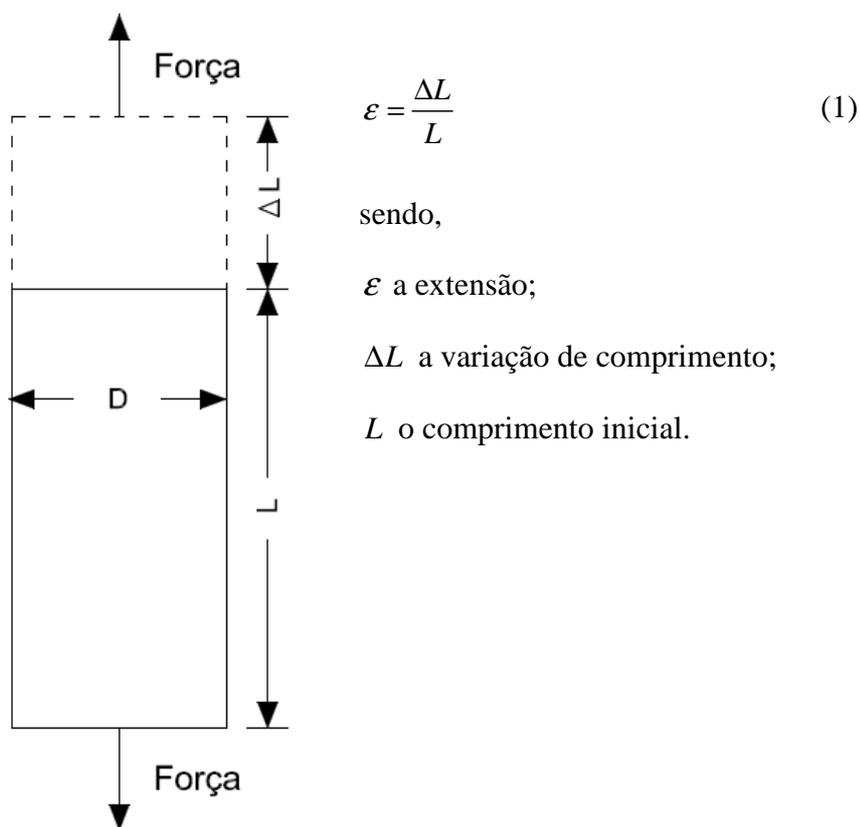


Figura 2.1: Definição de extensão

A extensão pode assumir um valor positivo, caso a variação de comprimento aumente em relação ao seu valor inicial, ou negativo caso contrário. Como na generalidade dos materiais utilizados em engenharia de estruturas a extensão tem valores pequenos, muitas vezes é expressa em *microstrain* ($\mu\varepsilon$), correspondente à multiplicação da extensão por 10^{-6} .

Os extensómetros são dispositivos utilizados para medir a extensão numa dada direcção, para um qualquer corpo. Existem vários tipos de extensómetros, classificados, em regra, em função do seu princípio de funcionamento.

Os extensómetros, como os outros sensores, possuem características intrínsecas, entre as quais o campo de medida, que corresponde à máxima extensão que consegue medir, e a sensibilidade (precisão), que é o menor valor de extensão que consegue detectar.

Independentemente do seu princípio de funcionamento, os extensómetros podem também ser distinguidos em função do seu modo de utilização. Dependendo do material e do tipo de utilização, estes sensores podem ser instalados no interior do betão ou à superfície de elementos de betão ou metálicos (Figura 2.2).

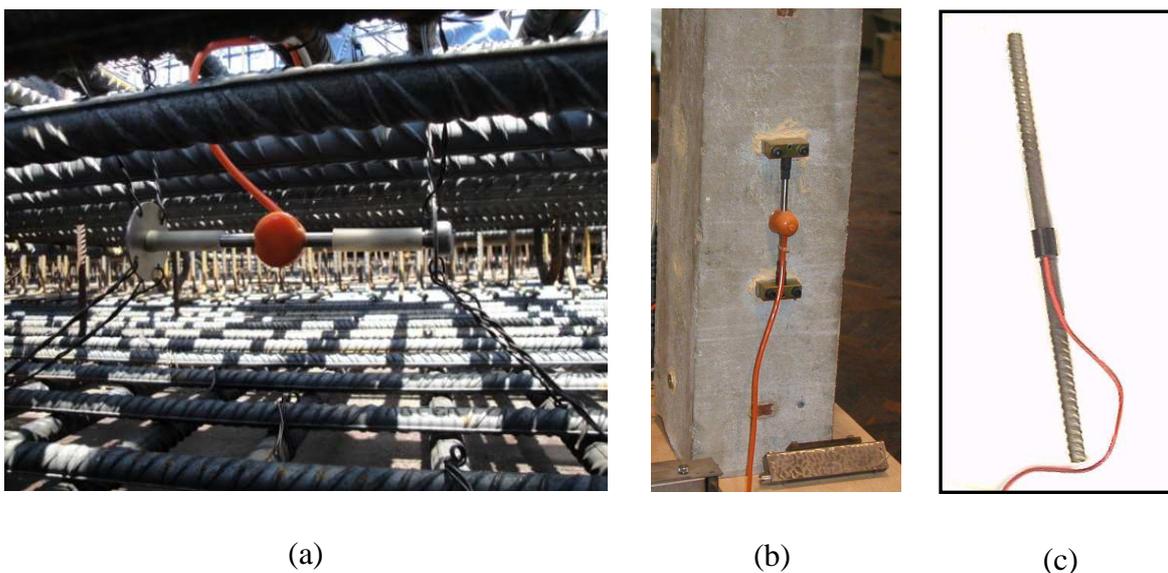


Figura 2.2: Exemplos de extensómetros para embeber (a), para aplicar à superfície (b) e para armaduras (c)

Em regra, são utilizados sensores embebidos na generalidade das estruturas de betão instrumentadas. Quando se pretende medir as extensões que ocorrem nas armaduras ou em elementos metálicos, são utilizados sensores de aplicar à superfície. As diferenças residem unicamente no modo como é feita a amarração do sensor ao elemento a medir.

Na concepção dos sensores é importante a utilização de um material com módulo de elasticidade o mais próximo possível do elemento a ensaiar. Como neste trabalho foram usados dois tipos de betão distintos, é previsível a obtenção de resultados diferentes nos sensores utilizados em betões de pontes e de barragens.

2.2. Tipos de dispositivos para medição de extensões

Conforme referido anteriormente, existem vários tipos de sensores, distinguidos em função dos seus princípios de funcionamento.

No presente trabalho foram escolhidos os sensores com maior utilização no LNEC, nomeadamente os extensómetros de corda vibrante, na observação de pontes, e os extensómetros de resistência eléctrica tipo Carlson, na observação de barragens. Como referido, foram considerados sensores de fibra óptica como alternativa aos extensómetros ditos “tradicionalis”.

Seguidamente faz-se uma breve descrição dos sensores referidos, bem como dos transdutores de deslocamento capacitivos que foram utilizados no presente trabalho como elementos de referência.

2.2.1. Extensometria mecânica – transdutores de deslocamento capacitivos

Por definição um transdutor é um dispositivo capaz de converter um dado fenómeno físico num outro. Os transdutores mais comuns convertem grandezas físicas não eléctricas em grandezas eléctricas.

No que se refere à sua estrutura, um condensador eléctrico consiste em dois condutores eléctricos, usualmente duas placas, separadas por um material isolador, dito dieléctrico [Coelho, 2005]. As variações da capacidade podem ser provocadas por redução da área frente a frente, da separação entre placas ou por variação da constante dieléctrica do material. A capacidade de um dado sensor é dada por,

$$C = A \cdot \frac{K \cdot \epsilon_0}{l_g} \quad (2)$$

sendo,

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ a permissividade do ar;

$K \cdot \epsilon_0$ a permissividade do material;

A a área das placas;

l_g a distancia entre placas.

Deste modo, qualquer arranjo que modifique as grandezas pode ser transformado num transdutor capacitivo.

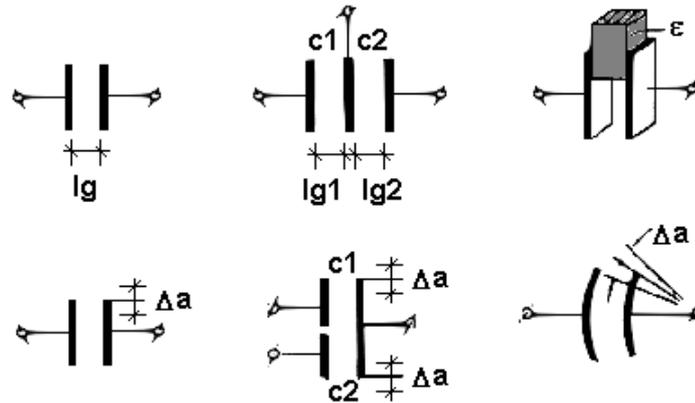


Figura 2.3: Exemplos de configurações de transdutores capacitivos [Coelho, 2005]

Os sensores do tipo capacitivo podem ser aplicados na medição directa de deslocamentos ou quaisquer fenómenos passíveis de serem convertidos em deslocamentos, como, por exemplo, pressão e força.

No presente trabalho foram utilizados sensores de utilização corrente no LNEC, da marca “Mitutoyo”.



Figura 2.4: Transdutor capacitivo de deslocamento da marca “Mitutoyo” montado num provete

2.2.2. Extensometria acústica – extensómetros de corda vibrante

O princípio de funcionamento de um sensor de corda vibrante baseia-se no facto da frequência de vibração de uma corda de aço traccionada variar em função da tensão instalada na corda [Silva, 2001].

Os sensores de corda vibrante são principalmente conhecidos pela sua longevidade [DiBiagio, 2003]. A primeira referência de utilização dum sensor de corda vibrante data de 1888 e foi realizada pelo italiano Pietro Cardani [DiBiagio, 2003]. A sua longevidade é devida ao simples e eficaz princípio de funcionamento, que depende unicamente das características dos materiais que o compõem.

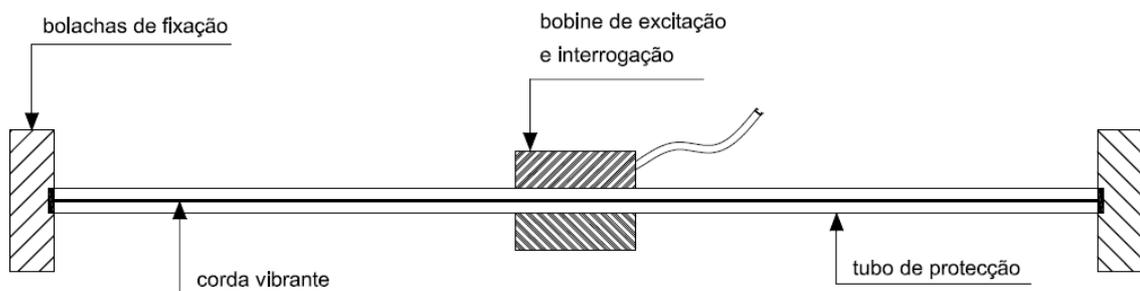


Figura 2.5: Constituição esquemática de um extensómetro de corda vibrante

Como se mostra na Figura 2.5, estes sensores são essencialmente constituídos por dois elementos principais. O primeiro é uma corda de aço que se encontra tensionada e fixa pelas suas extremidades, o segundo é uma bobine que tem como função a excitação da corda e, posteriormente, a medição da frequência de vibração [Lee *et. al.*, 2010].

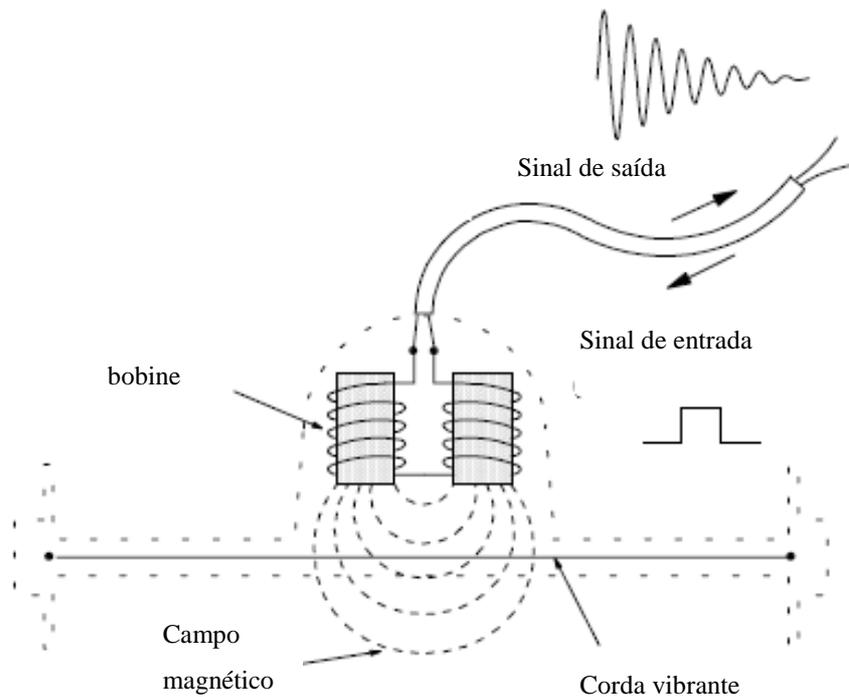


Figura 2.6: Representação esquemática do princípio de funcionamento de um extensômetro de corda vibrante

A Figura 2.6 ilustra o princípio de funcionamento dum sensor de corda vibrante. Uma bobine, com um núcleo magnético, é colocada próxima da corda. Quando percorrida por uma corrente eléctrica, esta cria um campo electromagnético que excita a corda, ficando a oscilar à frequência natural até parar por amortecimento. Por sua vez, a oscilação da corda induz uma corrente alterna na bobine que é detectada pelo sistema de aquisição. Note-se que a corda deve ser composta por aço magnético, de forma a responder à excitação provocada pelo campo magnético.

A frequência de vibração da corda tensionada relaciona-se com a tensão instalada através da expressão,

$$f = \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{m}} \quad (3)$$

sendo,

l o comprimento da corda;

σ o valor de tensão a que a corda está sujeita;

m a massa da corda.

Após a instalação do sensor, a tensão da corda altera-se devido à acção de forças externas. A variação de extensão será portanto expressa pela fórmula,

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_f - \varepsilon_i = c \cdot (f_f^2 - f_i^2) \quad (4)$$

$$\varepsilon = c \cdot f^2 \quad (5)$$

$$c = \frac{4 \cdot l^2 \cdot m}{E} \quad (6)$$

sendo,

$\Delta\varepsilon$ a diferença de extensão;

ε_i e ε_f as extensões iniciais e finais, respectivamente;

c uma constante definida pelas propriedades da corda;

f_i e f_f as frequências iniciais e finais respectivamente;

E o módulo de elasticidade do aço da corda.

A relação (5) entre a variação de extensão e a correspondente variação de frequência da corda segue uma lei quadrática [Félix, 2004].

Actualmente, este é o método mais utilizado para a leitura deste tipo de sensores, designado por “*pluck-read mode*” [DiBiagio 2003].

Os sensores de corda vibrante são influenciados pela temperatura. No caso dum extensómetro embebido, o aumento da temperatura irá provocar uma extensão no betão, assim como uma extensão no aço da corda. Se o betão e o aço não tiverem o mesmo coeficiente de dilatação térmica linear, será então necessário aplicar uma correcção ao valor adquirido pelo extensómetro.

Na realização deste trabalho foram utilizados sensores da marca “*Gage technique International Ltd.*”, cujas características técnicas se apresentam em anexo [Anexo A].



Figura 2.7: Extensómetro de corda vibrante da marca “*Gage technique International Ltd.*” aplicado num molde

Estes sensores são caracterizados por uma grande longevidade e durabilidade [DiBiagio, 2003].

A sua maior desvantagem é não terem capacidade de realizar medições em regime dinâmico, uma vez que o seu funcionamento é demasiado lento para as elevadas cadências de medição exigidas pelas medições neste regime.

2.2.3. Extensometria de resistência eléctrica - extensómetros tipo Carlson de pequena base

Os sensores de resistência eléctrica tipo Carlson são compostos por um tubo de latão selado nas suas extremidade e em parte canelado para aumentar a sua deformabilidade. No seu interior encontra-se uma estrutura de aço que suporta quatro isoladores de porcelana aos quais se fixam dois enrolamentos de fio de aço com as suas respectivas resistências R1 e R2 [Fialho, 1969].

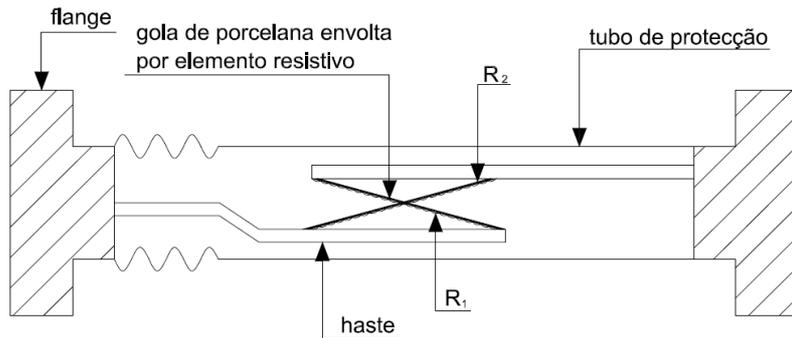


Figura 2.8: Constituição dum extensómetro tipo Carlson

Como se pode verificar na Figura 2.8, ao dar-se um deslocamento as duas golas deslocam-se, sendo que um dos fios é tensionado enquanto o outro é comprimido. Assim, os dois enrolamentos sofrem deformações iguais mas opostas.

Ao medir-se a resistência total dos dois enrolamentos em série, obtém-se a variação de temperatura sabendo-se $(R_1 + R_2)$, medindo-se a razão das duas resistências $(\frac{R_1}{R_2})$ obtém-se o valor da extensão não afectada pela temperatura.

Na prática, através da unidade de aquisição, são lidas as grandezas R_1 e $R_T = R_1 + R_2$. Ao realizarmos as seguintes operações, tem-se,

$$T = (R_T - R_0) \cdot D_t \quad (7)$$

$$\varepsilon = (T - T_0) \cdot e_2 + \left(\frac{R_1}{R_2} \cdot 100 - RR_0 \right) \cdot e_2 \cdot 100 \quad (8)$$

Cada aparelho tem constantes características fornecidas pelo fabricante, sendo,

D_t , e_1 e e_2 constantes do aparelho;

R_0 , T_0 e RR_0 valores iniciais para os quais o aparelho foi calibrado.

Os valores das constantes do sensor assim como os valores iniciais do aparelho podem encontrar-se nas respectivas fichas técnicas [Anexo A].

No presente trabalho, foram utilizados sensores da marca “*KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.*” cujas características técnicas se apresentam no Anexo A.



Figura 2.9: Extensômetro de resistência eléctrica tipo Carlson da marca “*KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.*” aplicado num molde

Estes aparelhos são caracterizados por uma grande robustez, sendo sobretudo utilizados na observação de barragens.

2.2.4. Extensometria óptica – extensómetros de redes de Bragg

Os extensómetros de fibra óptica baseiam-se nas alterações das propriedades da luz quando sujeitas a deformações externas. Na verdade, qualquer alteração física ou ambiental provoca variações na fase, intensidade, no comprimento de onda ou na polarização da luz que se propaga no interior da fibra óptica [Felix, 2004].

Existem vários tipos de sensores de fibra óptica, distinguidos em função do seu princípio de funcionamento. Actualmente, os sensores de Bragg e os sensores de Fabry-Pérot têm sido as tecnologias mais utilizadas em estruturas de engenharia civil. No presente trabalho serão unicamente considerados os sensores de fibra óptica baseados nas redes de Bragg.

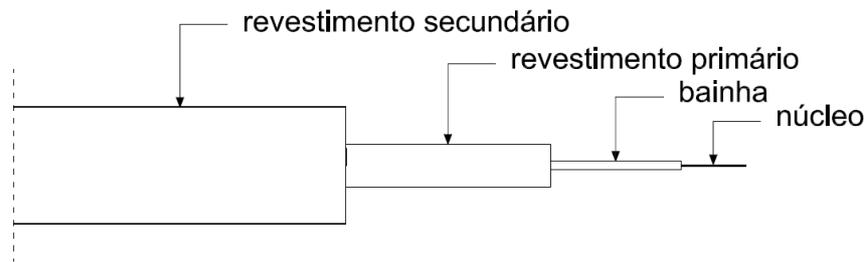


Figura 2.10: Representação esquemática da composição de uma fibra óptica

As fibras ópticas são compostas por um núcleo (geralmente de vidro ou de plástico) de reduzido diâmetro e muito flexível, responsável pela transmissão da luz. O núcleo é envolto por uma bainha, com um índice de refração inferior, de forma a garantir que o feixe luminoso permaneça no seu interior. Finalmente, a bainha é envolta por revestimentos exteriores, um primário e um secundário, dotados de propriedades que asseguram a resistência mecânica de todo o conjunto (Figura 2.10).

O desenvolvimento dos sensores de fibra óptica baseados nas redes de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Grating*) foi iniciado com a descoberta da fotossensibilidade das fibras ópticas, em 1978, no Canadá [Hill, 1978].

A rede de Bragg é um filtro espectral de altíssima selectividade modelado de forma a filtrar e reflectir um determinado comprimento de onda de um espectro de luz incidente. Incorporada esta rede no interior da fibra óptica, para um dado período de modelação da rede Λ é reflectido um comprimento de onda muito específico λ_0 , sendo a restante luz transmitida ao longo da fibra (Figura 2.11).

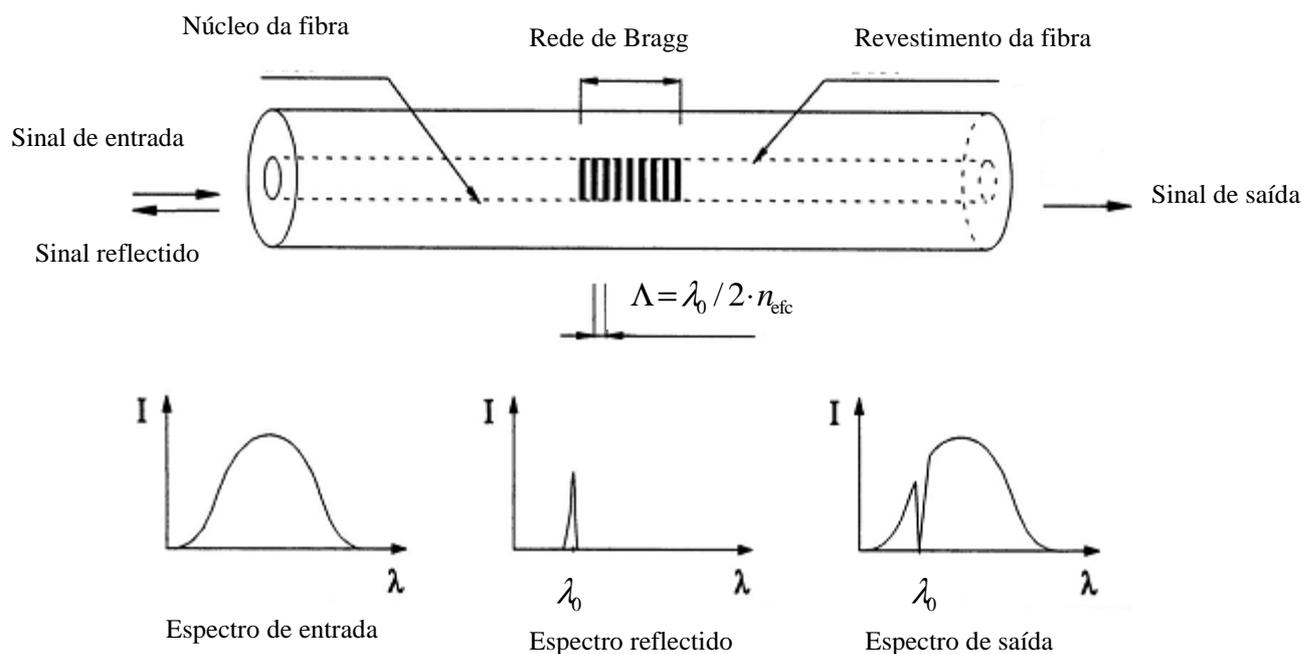


Figura 2.11: Representação conceptual do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg em fibra óptica

O comprimento de onda de ressonância λ_0 do espectro em reflexão é estabelecido pela condição de Bragg,

$$\lambda_0 = 2 \cdot n_{\text{efc}} \cdot \Lambda \quad (9)$$

sendo,

n_{efc} o índice efectivo do modo guiado;

Λ o período de modelação da rede de Bragg.

A variação do comprimento de onda reflectida $\Delta\lambda$ depende das alterações do índice efectivo do modo guiado n_{efc} ou do período de modelação da rede Λ , qualquer uma destas sendo consequência da variação de deformação ou de temperatura a que o sensor está sujeito (Figura 2.12).

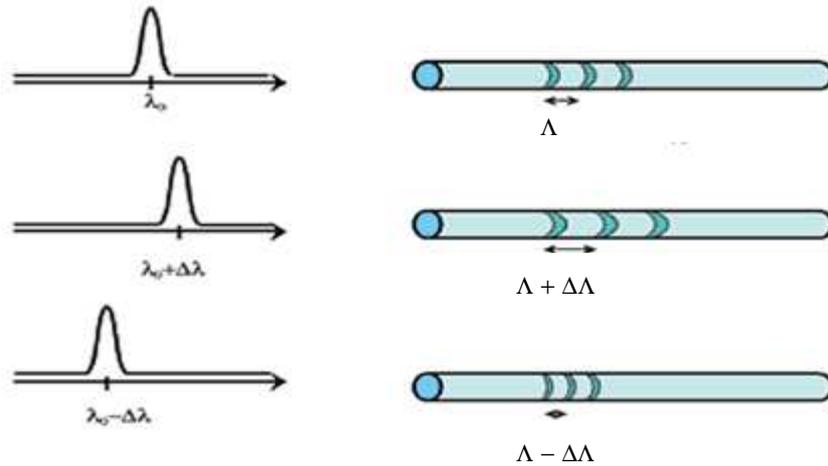


Figura 2.12: Representação esquemática do efeito da variação de extensão numa rede de Bragg
 [www.sensormag.com]

Para aplicações práticas, pode escrever-se,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = GF \cdot \varepsilon + \beta \cdot \Delta T \quad (10)$$

sendo,

ε a deformação axial ou extensão;

ΔT a variação de temperatura;

GF e β os coeficientes que dependem das características da fibra óptica utilizada.

Uma das grandes vantagens da tecnologia inerente a este tipo de sensores é a técnica de multiplexagem, neste caso utilizada sem recurso a instrumentos externos. A multiplexagem consiste na transmissão em simultâneo de sinais provenientes de diferentes sensores através de um mesmo condutor [Félix, 2004]. Com esta tecnologia é possível integrar na mesma fibra vários sensores em esquemas de multiplexagem.

Em comunicações ópticas existem duas formas básicas de multiplexagem: a multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM – Wavelength Division Multiplexing) e a multiplexagem por divisão de tempo (TDM – Time Division Multiplexing).

A mais utilizada técnica na multiplexagem de sensores de fibra óptica é a multiplexagem por divisão de comprimento de onda [Cooper, 1999]. Como é possível observar na Figura 2.13, neste método cada sensor funciona em diferentes intervalos de comprimento de onda, havendo a necessidade de assegurar que nenhum dos intervalos relativos a um sensor específico se sobreponha aos dos sensores adjacentes, para que não haja interferências de sinais.

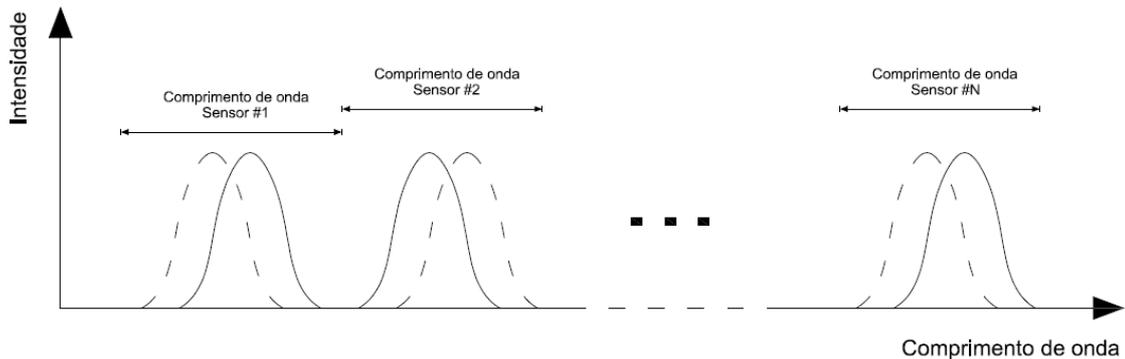


Figura 2.13: Multiplexagem por divisão de comprimento de onda

Por sua vez, na multiplexagem por divisão de tempo, vários sensores com o mesmo comprimento de onda de referência são colocados ao longo da fibra. Para identificar o sensor desejado é necessário medir o tempo que o sinal luminoso demora desde que é emitido, até que, após ser reflectido, retorna à fonte.

Na realização deste trabalho, foram utilizados sensores da marca “*FiberSensing, Sistemas Avançados de Monitorização, S.A.*”, cujas características técnicas se apresentam no Anexo A.

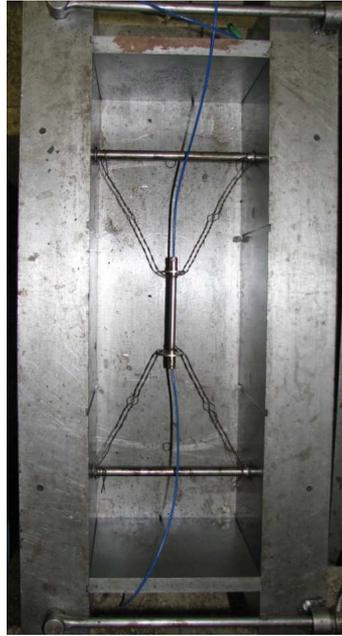


Figura 2.14: Extensómetro de fibra óptica da marca “*FiberSensing, Sistemas Avanzados de Monitorização, S.A.*” aplicado num molde

Estes sensores são imunes às interferências electromagnéticas e podem ser utilizados a altas temperaturas assim como em ambientes corrosivos e com alto teor de humidade.

Em contrapartida, apresentam uma grande fragilidade a nível de manuseamento. Devido ao seu recente surgimento, ainda não existem relatos que provem a sua longevidade.

3. PLANO DE ENSAIOS

3.1. Tipo e composição de betão

Dados os objectivos do presente trabalho, foram utilizados dois tipos distintos de betão, um produzido na construção de um tabuleiro de uma ponte e outro fabricado com a composição semelhante à utilizada em barragens de pequena a média dimensão. As principais diferenças entre ambos residem na máxima dimensão dos agregados assim como na dosagem de cimento. Estas diferenças de composição traduzem-se em propriedades e comportamentos diferentes.

Para a moldagem dos provetes com “betão de pontes”, utilizou-se betão proveniente da construção do tabuleiro da nova ponte ferroviária sobre o rio Sado, na variante de Alcácer do Sal.

Para a moldagem dos provetes com “betão de barragens”, visto não se encontrar nenhuma barragem em construção, foi reproduzido no laboratório do Departamento de Materiais do LNEC um betão com características idênticas ao utilizado, recentemente, na barragem de Ferradosa, em Freixo de Espada à Cinta.

Na Tabela 3.1, apresentam-se as composições utilizadas nos dois tipos de betão.

Tabela 3.1: Composição dos betões.

Betão de pontes		Betão de barragens	
Componentes	Quantidade	Componentes	Quantidade
Cimento II/A - L 42,5 R (kg/m ³) ¹	400	Cimento II/A - L 42,5 R (kg/m ³) ¹	140
Cinzas volantes (kg/m ³)	50	Cinzas volantes (kg/m ³)	60
Areia fina (kg/m ³)	220	Areia fina (kg/m ³)	294
Areia grossa (kg/m ³)	520	Areia grossa (kg/m ³)	513
Brita 1 (12/20 mm) (kg/m ³)	540	Brita 1 (12/20 mm) (kg/m ³)	467
Brita 2 (16/22 mm) (kg/m ³)	500	Brita 2 (16/22 mm) (kg/m ³)	271
Água (l/m ³)	165	Brita 3 (20/40 mm) (kg/m ³)	621
Adjuvante 1 (Pozzoloth 390 N) (ml)	1,8	Água (l/m ³)	90
Adjuvante 2 (Glenium Sky 511 R) (ml)	5,4	Adjuvante (Sikament 195 R) (ml)	70

¹ Cimento: CEMII/A – L 42,5 R – Cimpor Alhandra

3.2. Numero e tipo de provetes

No âmbito do presente trabalho, foram realizados dois tipos distintos de provetes. Para o ensaio para determinação da resistência em compressão (§3.4.1), foram moldados provetes cúbicos, para o ensaio para determinação do módulo de elasticidade (§3.4.2), foram realizados provetes prismáticos.

3.2.1. Provetes cúbicos

De forma a determinar a tensão de rotura dos betões nas diferentes idades, foram moldados nove cubos com 15 cm de aresta para cada tipo de betão. Foram, assim, efectuados ensaios de compressão à rotura (§3.4.1) de conjuntos de provetes às idades 7, 28 e 90.

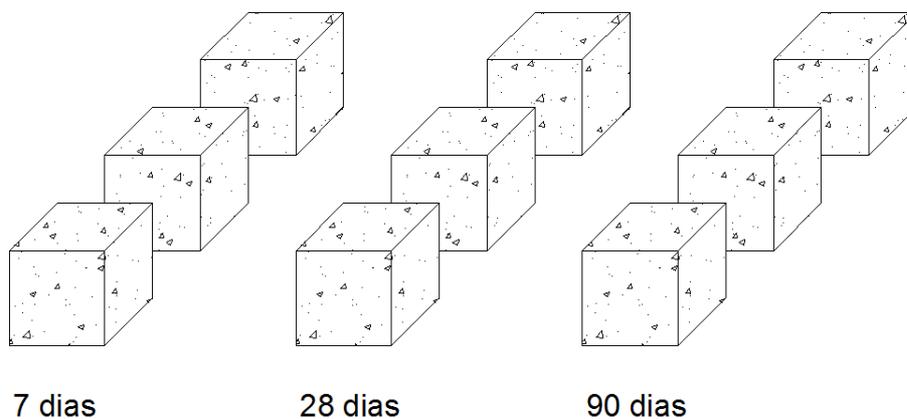


Figura 3.1: Esquema ilustrativo do número de provetes cúbicos

3.2.2. Provetes prismáticos

Para a realização dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade foram moldados provetes prismáticos de dimensões 20x20x60 cm.

Previamente à moldagem dos provetes, foi feito um estudo para avaliação da melhor forma de inserção dos sensores no interior dos provetes. Foram considerados três hipóteses: dois

sensores inseridos em série (Figura. 3.2 a)); dois sensores inseridos em paralelo (Figura. 3.2 b)); e, finalmente, um só sensor por provete (Figura. 3.2 c)). Tendo em conta que a máxima dimensão dos agregados era de 38 mm, e para garantir que as tensões fossem absorvidas do mesmo modo por todos os sensores, foi escolhido utilizar-se um só sensor por provete.

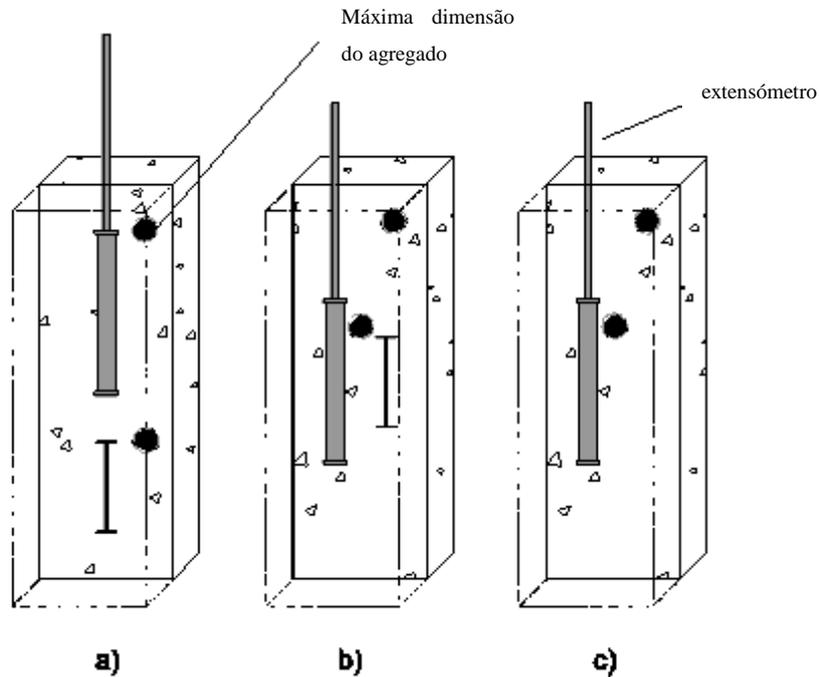
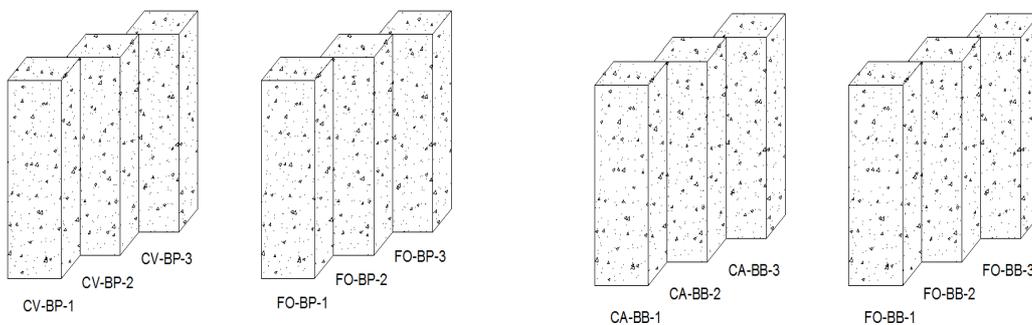


Figura 3.2: Figura ilustrativa das possibilidades estudadas para colocação dos sensores no interior dos provetes

Foram então realizados seis provetes prismáticos com betão de pontes e seis provetes prismáticos com betão de barragens (Figura 3.3).



(a) Provetes de betão de pontes

(b) Provetes de betão de barragens

Figura 3.3: Esquema ilustrativo do número de provetes prismáticos de betão de pontes (a) e de barragens (b)

Quanto à nomenclatura utilizada, a escolha foi a seguinte,

FO: sensores de fibra óptica

CV: sensores de corda vibrante

CA: sensores tipo Carlson

BP: betão de pontes

BB: betão de barragens.

Na seguinte tabela apresentam-se as designações de todos os provetes prismáticos utilizados para a realização do presente trabalho.

Tabela 3.2: Designação dos provetes prismáticos

Provetes prismáticos 20x20x60 cm		Tipo de sensor			Nº total de provetes
		Fibra óptica	Corda vibrante	Carlson	
Tipo de betão	Betão de pontes	FO-BP-1	CV-BP-1	-	6
		FO-BP-2	CV-BP-2	-	
		FO-BP-3	CV-BP-3	-	
	Betão de barragens	FO-BB-1	-	CA-BB-1	6
		FO-BB-2	-	CA-BB-2	
		FO-BB-3	-	CA-BB-3	

3.3. Construção dos provetes

Na construção dos provetes prismáticos foram utilizados moldes metálicos assegurando-se assim uma elevada qualidade na forma dos provetes. Este tipo de moldes garante o desempenho do topo dos provetes, onde é feita a transmissão de tensões, assim como a ortogonalidade das faces. São igualmente asseguradas as dimensões pretendidas.



Figura 3.4: Molde metálico utilizado na construção dos provetes prismáticos

Na execução dos provetes cúbicos, para a realização dos ensaios destrutivos em compressão, foram utilizados moldes plásticos para o betão de pontes, fornecidos em obra, assim como moldes metálicos para o betão de barragens, utilizados em laboratório.



(a)



(b)

Figura 3.5: Moldes plásticos (a) e metálicos (b) utilizados nos provetes cúbicos.

Quanto à montagem dos extensómetros no interior dos moldes, foi assegurada a equidistância às faces, tanto na direcção transversal como longitudinal do provete. Para tal, as extremidades dos sensores foram fixas às barras das bases de medida dos deflectómetros através de arames robustos.



Figura 3.6: Posicionamento dos vários tipos de extensómetros nos moldes

Como referido no §3.1, o betão de pontes é proveniente do tabuleiro da ponte ferroviária sobre o rio Sado. O betão foi fabricado numa central existente no estaleiro da obra e transportado até ao local da betonagem por camiões betoneira. Para a moldagem dos provetes foi efectuada uma descarga do volume necessário por um destes veículos (Figura 3.7).



Figura 3.7: Moldagem de provetes com betão de pontes

Quanto ao betão de barragens foram realizadas duas amassaduras de 120 litros cada, no Laboratório de Betões do Departamento de Materiais do LNEC.



Figura 3.8: Fabrico do betão de barragens utilizado para moldagem dos provetes

No que diz respeito à betonagem dos provetes, foram tidas em atenção algumas precauções de modo a assegurar a correcta posição do sensor embebido, bem como garantir uma distribuição uniforme do betão no interior do molde. Foi realizada a betonagem até meia altura, seguida de uma vibração cuidada desse volume, e só posteriormente se concluiu o enchimento dos moldes, seguida de nova vibração (Figuras 3.9 e 3.10).



Figura 3.9: Moldagem dos provetes de betão de pontes em estaleiro



Figura 3.10: Moldagem dos provetes de betão de barragens em laboratório

Quanto à cura do betão de pontes, devido às condicionantes inerentes a uma obra, a mesma não foi a mais adequada pois apenas houve uma pequena protecção às acções do sol e do vento assegurada por uma tábua de cofragem, resultando em alguma secagem superficial.

Relativamente à cura do betão de barragens, dadas as melhores condições laboratoriais, foi realizada uma cura apropriada do betão, tendo os provetes sido mantidos numa sala com condições controladas a uma temperatura de 20°C e humidade relativa de 70%. A face exposta foi igualmente humidificada nos dois dias seguintes à moldagem, para evitar a secagem superficial.

Deve referir-se que a betonagem dos provetes de betão de barragens, apesar de realizada em laboratório, foi dificultada pela elevada consistência da mistura (Figura 3.11).

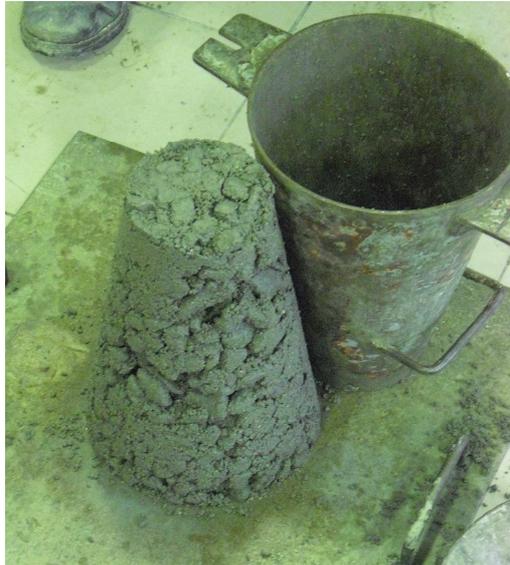


Figura 3.11: Avaliação da consistência do betão de barragens com cone de Abrams

Finalmente, a desmoldagem dos provetes foi efectuada no LNEC (Figura 3.12 a) e b)), para o betão de pontes no dia seguinte à betonagem, e para o betão de barragens dois dias após a betonagem. Posteriormente à betonagem, os provetes prismáticos foram mantidos em ambiente controlado a 20°C de temperatura e 70% de humidade relativa, enquanto os provetes cúbicos foram levados para a câmara saturada a 20°C de temperatura e 100% de humidade relativa (Figura 3.12 c)).



a)



b)



c)

Figura 3.12: Desmoldagem e cura dos provetes prismáticos

3.4. Tipo e condicionamento dos ensaios

Os ensaios escolhidos para comparar o desempenho dos vários dispositivos de medição utilizados foram o ensaio para determinação do módulo de elasticidade em compressão, para medição de extensões forçadas e instantâneas, e o ensaio de retracção livre, para determinação das extensões em regime livre.

Para a realização do ensaio de determinação do módulo de elasticidade foi necessária a realização prévia de ensaios de compressão para determinação da tensão de rotura.

3.4.1. Ensaio destrutivo para determinação da resistência em compressão

Para a determinação da tensão de rotura do betão foi utilizada como referência a Norma Portuguesa NP EN 12390-3 2009 [IPQ, 2009].

Para este ensaio são utilizados provetes cúbicos com 15 cm de aresta §3.2.1. Estes são inicialmente pesados, assegurando-se que as suas faces se encontrem lisas.

Os provetes são posteriormente colocados numa prensa com dois pratos de aço de dimensões iguais ou superiores às das faces de assentamento dos provetes e de espessura suficiente para garantir a sua rigidez. Um dos pratos, normalmente o superior, deve ser provido de uma rótula esférica para garantir que a aplicação das forças seja perpendicular à face superior do provete.



(a) Pesagem de provetes



(b) Prensa para ensaio destrutivo de provetes

Figura 3.13: Prensa para pesagem (a) e ensaio destrutivo (b) de provetes

De seguida os cubos são centrados sobre o prato inferior da máquina, descendo-se o prato superior de forma a realizar um contacto uniforme com o provete, sem que este entre em carga. É então aplicada uma força gradualmente crescente, de forma contínua e constante, sem choques, até se dar a rotura do provete. A força de rotura corresponde à máxima força aplicada durante o ensaio. Conhecendo a força de rotura e a área da face do provete cúbico ensaiado, é então possível determinar a tensão de rotura do betão para uma determinada idade,

$$f_c = \frac{F}{A} \times 10^3 \quad (11)$$

onde,

f_c a tensão de rotura expressa em MPa ;

F a força máxima aplicada durante o ensaio em kN ;

A a área de uma das faces do provete cúbico em m^2 .



Figura 3.14: Aspecto das superfícies de rotura dos provetes cúbicos

O resultado é considerado válido se respeitar os requisitos de avaliação da conformidade do betão da NP EN 12390-3:2009 “*Ensaio do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes*”.

A cada idade do betão, são realizados três ensaios com três provetes, de forma a obter representatividade do valor obtido. O valor final é então a média dos valores obtidos nos três ensaios. Estes valores são apresentados e analisados no §4.1.

3.4.2. Ensaio não destrutivo para determinação do módulo de elasticidade

Para a realização do ensaio de determinação do módulo de elasticidade foi utilizada como referência a especificação do LNEC 397 - Determinação do módulo de elasticidade em compressão [LNEC, 1993].

Previamente ao início do ensaio, é necessário conhecer o valor da tensão de rotura à compressão f_c , obtida no ensaio descrito em §3.4.1.

Os provetes para este ensaio são prismáticos e de secção quadrada. A relação entre o comprimento e a aresta não deve ser inferior a três e a aresta deve ser igual a pelo menos quatro vezes a máxima dimensão do agregado, com um mínimo de 100 mm. Sendo a máxima dimensão do agregado utilizado nos ensaios de 38 mm, e tendo em conta a dimensão dos sensores a embeber, foi escolhida a realização de provetes prismáticos com dimensões 20x20x60 cm (§3.2.2).

Os provetes são colocados na máquina de ensaio, e em duas faces opostas são colocados dois deflectómetros, nos quais se irá medir a extensão durante a realização do ensaio.

É então aplicada uma tensão inicial de 0,6 MPa (σ_b), e medida a respectiva extensão (ϵ_b). De seguida, aumenta-se a tensão de uma forma contínua, a uma velocidade constante de 0,5 MPa/s a 1,0 MPa/s, até que a tensão $\sigma_a = \frac{f_c}{3}$ seja alcançada. A tensão aplicada é mantida durante 70s e aos 30s efectua-se uma medição da extensão (ϵ_{a_1}).

As extensões ($\epsilon_{a_1} - \epsilon_b$) nas duas bases de medida não devem diferir em mais de 10%. Se tal não acontecer deverá retirar-se a carga e centrar de novo o provete. Se a centragem for satisfatória, reduz-se de novo a carga de forma a atingir novamente a tensão σ_b e efectua-se uma nova leitura aos 30s dum patamar de carga mantido constante durante 70s.

Antes de se efectuarem as leituras de ensaio é aconselhável esperar aproximadamente três ciclos de carga/descarga de forma a “ajustar” o provete à máquina, sobretudo nas primeiras idades, nas quais o betão ainda não atingiu um endurecimento significativo. A extensão ($\epsilon_a - \epsilon_b$) a considerar é a média das extensões nas duas bases de medida.



Figura 3.15: Prensa para ensaio de módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade em compressão E_c , em GPa , é definido pela expressão,

$$E_{c,n} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_{a,n} - \varepsilon_{b,n}} \times 10^{-3} \quad (12)$$

sendo,

σ_a a tensão máxima aplicada, em MPa ;

σ_b a tensão mínima aplicada, em MPa ;

$\varepsilon_{a,n}$ a extensão para a tensão σ_a , medida no “n-ésimo” ciclo de carga;

$\varepsilon_{b,n}$ a extensão para a tensão σ_b , medida no “n-ésimo” ciclo de carga.

Nos ensaios foram realizados aproximadamente sete ciclos de carga e descarga para cada provete, e após o provete se encontrar centrado, as leituras foram efectuadas a partir do 3º ciclo.



Figura 3.16: Deflectómetro aplicado numa das faces do provete

Em paralelo com o registo dos valores das extensões obtidos através dos deflectómetros, foram efectuadas medições com os sensores embebidos nos provetes, para posterior análise e comparação.

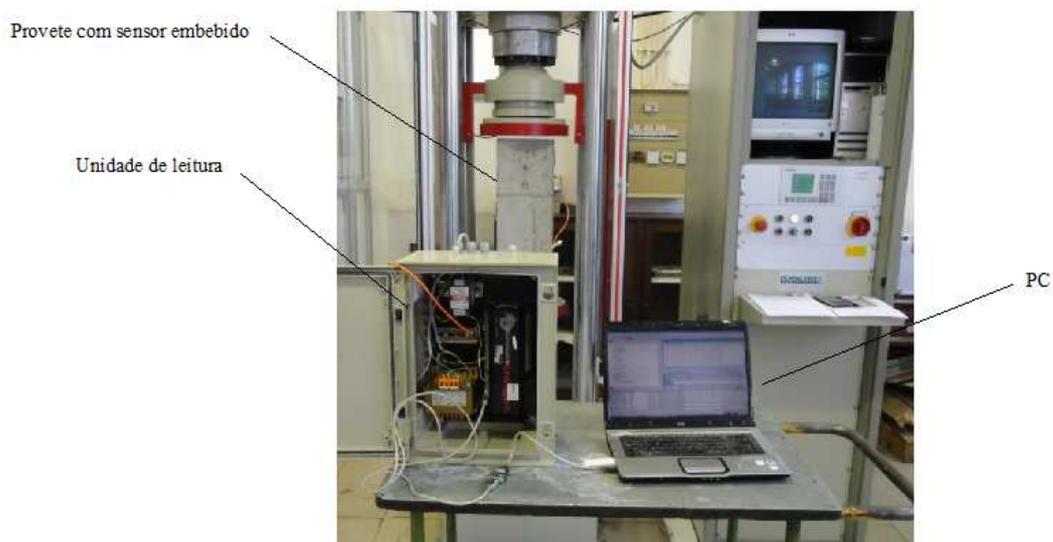


Figura 3.17: Sistema de aquisição para leitura do sensor embebido no provete

3.5. Cronograma dos ensaios e plano de leituras

Os ensaios para determinação das extensões instantâneas decorreram em idades específicas que, em geral, constituem as idades de referência para a caracterização das propriedades do betão, isto é, aos 7, 28 e 90 dias após moldagem dos provetes.

O plano de leitura referente aos ensaios de determinação das extensões instantâneas coincide com o cronograma de ensaio. As leituras de retracção livre consistiram em leituras pontuais ao longo do tempo, com espaçamento reduzido nos dias após moldagem e aumentando gradualmente até aos 90 dias.

Na Tabela 3.3 apresentam-se assinaladas as datas de realização dos ensaios para determinação das extensões instantâneas:

Tabela 3.3: Datas de realização dos ensaios

	Betão de pontes		Betão de barragens	
	Data	Idade (dias)	Data	Idade (dias)
Moldagem dos provetes	23-06-2010	0	08-07-2010	0
Ensaios aos 7 dias	30-06-2010	7	15-07-2010	7
Ensaios aos 28 dias	21-07-2010	28	05-08-2010	28
Ensaios aos 90 dias	21-09-2010	90	07-09-2010	91

3.6. Equipamentos

Dado o tipo de ensaios e para obter alguma representatividade dos resultados, foram moldados três provetes prismáticos por cada tipo de extensómetro embebido e três provetes cúbicos por cada tipo de betão e para cada idade de ensaio.

Os tipos de extensómetros ensaiados foram os extensómetros de corda vibrante (§2.2.2), extensómetros de resistência eléctrica tipo Carlson (§2.2.3) e extensómetros de fibra óptica (§2.2.4).

Para cada um dos ensaios recorreu-se também à medição das extensões utilizando deflectómetros (§2.2.1) colocados em duas faces opostas de cada provete.

Para aquisição das leituras nos sensores, foram utilizadas unidades de leitura, nomeadamente uma unidade *delogger* (§3.8.2) para os sensores de corda vibrante e tipo Carlson, e uma unidade *braggscope* (§3.8.3) para os sensores de fibra óptica.

Tabela 3.4: Extensómetros e unidades de leitura utilizados no betão de pontes e de barragens

	Deflectómetro	Extensómetro de Corda vibrante	Extensómetro tipo Carlson	Sensor de Fibra óptica
Betão de pontes				
Betão de barragens				
Unidade de leitura	Visual	Interrogador Datataker DT515 	Interrogador BraggSCOPE FS4600 	

3.7. Determinação das propriedades mecânicas dos betões

3.7.1. Generalidades

Quando uma carga é aplicada a um dado corpo, este sofre uma deformação. Para um determinado número de materiais, denominados materiais elásticos, dentro de uma dada gama de cargas, o corpo recupera a sua forma e dimensões iniciais. Nestes casos a deformação de um corpo é linearmente proporcional à força aplicada, podendo escrever-se,

$$F = K \cdot \delta \quad (13)$$

sendo,

F a força aplicada ao corpo;

δ o deslocamento sofrido pelo corpo;

K a rigidez do corpo.

A rigidez do corpo depende da sua geometria para além das propriedades do material. Para superar esta limitação, a força pode ser traduzida em tensão e a deformação em extensão.

A lei de Hooke traduz-se por,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (14)$$

sendo,

$\sigma = \frac{F}{A}$ a tensão que é igual à razão entre a força aplicada ao corpo e a área transversal à aplicação da força;

$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$ a extensão que é igual à razão entre o deslocamento sofrido pelo corpo e o seu comprimento inicial;

E o módulo de elasticidade do corpo, que depende unicamente das propriedades do material.

No caso do betão, o seu comportamento é, em geral, não elástico e não linear. Na Figura 3.18, encontra-se ilustrado o comportamento do betão até à rotura quando sujeito a uma tensão de compressão. Para baixos níveis de carga, a relação entre a tensão e a extensão do betão pode ser descrita utilizando uma relação linear.

Sendo o módulo de elasticidade a propriedade mais utilizada para caracterizar a deformabilidade do betão, os ensaios utilizados para a determinação do seu valor são realizados, em regra, aos 7, 28, 90 e 180 dias.

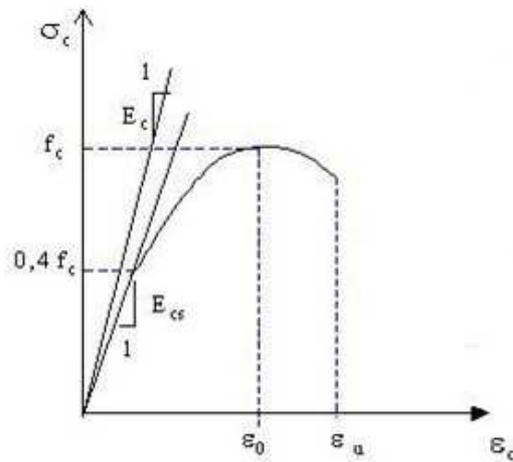


Figura 3.18: Diagrama tensão-deformação do betão até à rotura

O significado físico das grandezas referidas na Figura 3.18 é o seguinte:

σ_c a tensão do betão à compressão;

ϵ_c a deformação do betão à compressão;

ϵ_{c_0} a deformação inicial do betão;

E_c o módulo de elasticidade tangente inicial do betão;

E_{cs} o módulo de elasticidade secante do betão;

f_c a tensão de rotura do betão.

3.7.2. Tensão de rotura aos 7, 28 e 90 dias

A cada idade de ensaio dos provetes prismáticos, foram previamente levados à rotura três cubos como se encontra descrito no §3.4.1.

Nos ensaios destrutivos dos cubos é medida a força necessária para levar à rotura os três cubos da mesma idade. É então calculada a tensão de rotura aos 7, 28 e 90 dias para o betão de pontes assim como para o betão de barragens, considerando o valor médio dos três ensaios em cada idade.

3.7.3. Módulo de elasticidade aos 7, 28 e 90 dias

Na determinação do módulo de elasticidade dos provetes prismáticos foram sempre efectuadas duas medições em paralelo, com o sensor embebido e com o deflectómetro à superfície.

A primeira consiste na medição das extensões registadas pelo extensómetro que se encontra embebido no provete. Esta medição é realizada com um sistema de aquisição que fornece a evolução das extensões ao longo do tempo. Foi utilizada uma frequência de aquisição de 1 Hz (uma leitura por segundo), a qual foi mantida ao longo de todo o ensaio.

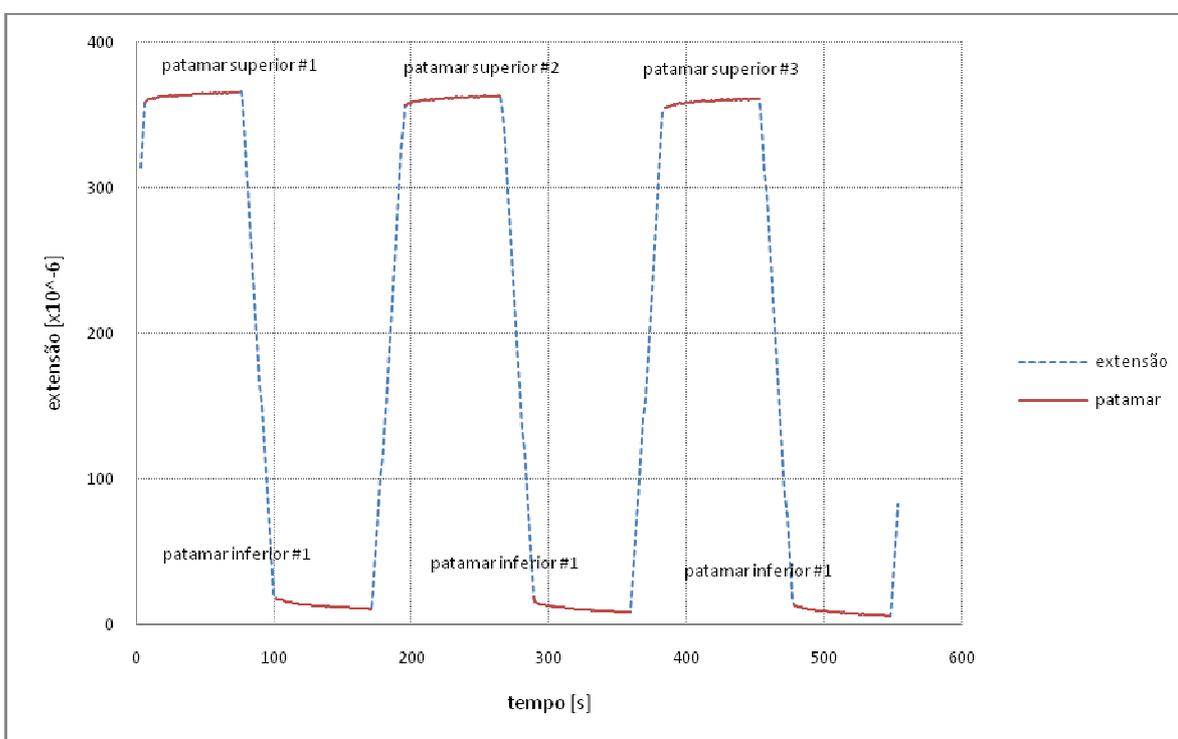


Figura 3.19: Diagrama representativo dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade – leitura através dum sensor embebido

Como se pode verificar através da análise da Figura 3.19, existem seis patamares de tensão constante, três para uma tensão inferior e três para uma tensão superior. Para cada patamar é então calculado um valor médio de todos os valores medidos da extensão medidos, obtendo-se seis valores de extensão média, três para uma tensão superior (15) e três para uma tensão inferior (16).

$$\varepsilon_{\text{sup},1} ; \varepsilon_{\text{sup},2} ; \varepsilon_{\text{sup},3} \Leftrightarrow \sigma_{\text{sup}} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{\text{inf},1} ; \varepsilon_{\text{inf},2} ; \varepsilon_{\text{inf},3} \Leftrightarrow \sigma_{\text{inf}} \quad (16)$$

Realizando a média das extensões inferiores e das tensões superiores, e utilizando a lei de Hooke (14), pode-se determinar o valor do módulo de elasticidade para uma determinada idade do betão (17),

$$E = \frac{\sigma_{\text{sup}} - \sigma_{\text{inf}}}{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{\text{sup},i}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{\text{inf},i}}{n}} \quad (17)$$

Como referido no §3.7.3, a segunda medição consiste na leitura em dois deflectómetros que se encontram colocados em duas faces opostas do provete. Estas medições são realizadas pontualmente a cada patamar de tensão.

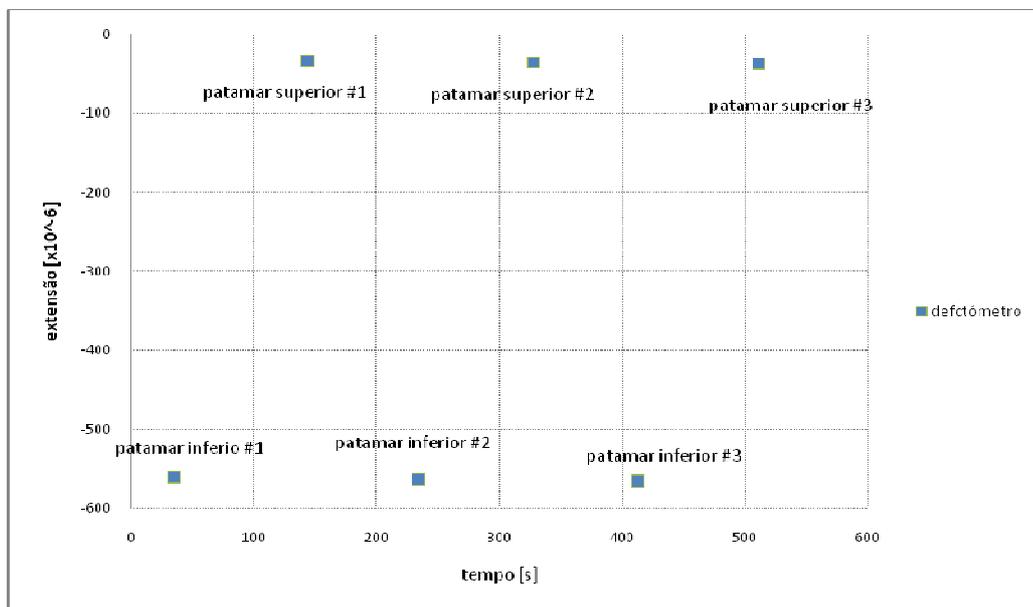


Figura 3.20: Diagrama representativo dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade – leitura através do transdutor de superfície

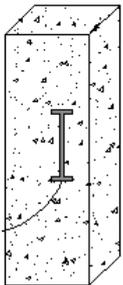
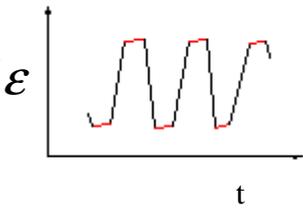
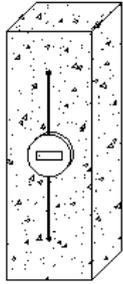
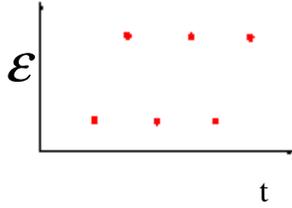
Obtêm-se assim seis valores pontuais de extensões, três para uma tensão superior e três para uma tensão inferior. Mais uma vez, realizando a média das extensões inferiores e das

tensões superiores, e utilizando a lei de Hooke, pode-se determinar o módulo de elasticidade para uma determinada idade do betão.

O método permite efectuar a comparação entre as diferenças de extensão obtidas para cada ciclo carga-descarga, utilizando os valores fornecidos pelo sistema de aquisição e os valores obtidos através de leituras dos deflectómetros (Tabela 3.5).

Este procedimento deve ser realizado para todos os provetes prismáticos, em todas as idades. Os valores obtidos nos ensaios irão posteriormente ser analisados no §4.

Tabela 3.5: Comparação dos dois tipos de medição efectuados nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade

Tipo de sensor	Aquisição de dados	Medição realizada	Valores a comparar
<p>Sensor embebido</p> 	<p>Automática</p>		<p>$\Delta \epsilon_{med,sensor}$</p>
<p>Transdutor de superfície</p> 	<p>Manual</p>		<p>$\Delta \epsilon_{med,deflectómetro}$</p>

3.7.4. Retracção dos provetes

As variações de volume ao longo do tempo do betão, independentes do estado de tensão, devem ser avaliadas, em particular quando se trata de estruturas de grande dimensão. Com efeito, as deformações impostas em estruturas de grande dimensão podem traduzir-se no aumento das deformações, em perdas de pré-esforço ou em redistribuição dos esforços [Santos, 2002].

O termo retracção é geralmente utilizado para descrever a diminuição de volume do betão ao longo do tempo. Na realidade, a retracção é definida como a variação de volume que ocorre numa peça, a temperatura constante e na ausência de qualquer tensão aplicada, desde o final da compactação até se atingir o estado limite de equilíbrio higrométrico como ambiente [Coutinho, 1994].

Existem quatro parcelas de retracção: retracção plástica, retracção por auto-dessecação (ou retracção autogénea), retracção por carbonatação e, finalmente, retracção por secagem [Lamond et al, 2006].

Em geral, o valor da extensão de retracção é considerado como a soma das duas principais parcelas: a retracção por secagem, que resulta da migração da água através do betão endurecido, e a retracção autogénea, que está associada à hidratação do cimento, desenvolvendo-se principalmente dos primeiros dias de cura do betão,

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad (18)$$

sendo,

ϵ_{cs} a extensão total por retracção;

ϵ_{cd} a extensão devida à retracção por secagem;

ϵ_{ca} a extensão devida à retracção autogénea.

Na Figura 3.21 ilustra-se graficamente o comportamento do betão quanto sujeito à retracção ao longo do tempo.

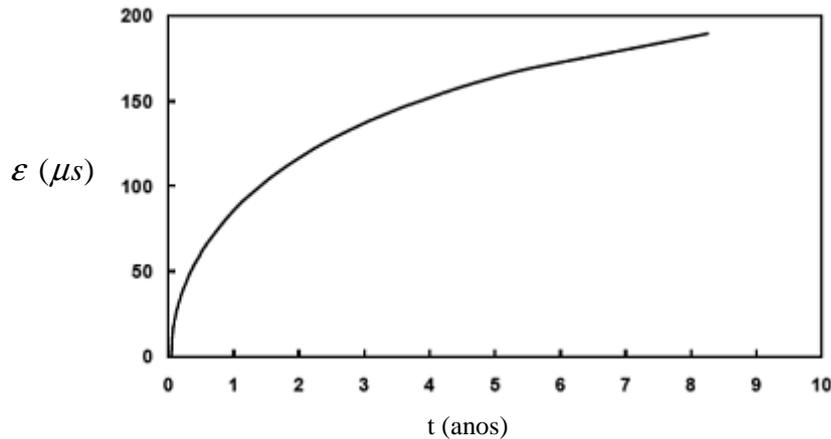


Figura 3.21: Diagrama de retracção do betão (valores de extensão em compressão)

Em paralelo aos ensaios descritos nos parágrafos anteriores, foram efectuadas leituras nos extensómetros embebidos de forma a poder determinar ao longo do tempo, os valores de extensão de retracção. Assim, foram efectuadas leituras em todos os sensores, para posteriormente se poder analisar e comparar os resultados obtidos.

3.8. Aquisição automática de dados

3.8.1. Generalidades

A aquisição automática de dados, através do recurso aos computadores pessoais ou industriais, é o processo pelo qual um fenómeno físico real é transformado num sinal eléctrico proporcional e convertido num formato digital para posterior visualização, armazenamento, processamento e análise [Serrano *et. al.*, 2004].

Em determinadas situações, o conceito de aquisição de dados consiste não só na aquisição mas igualmente no controlo por meio de acções dos sistemas interrogados, controlo esse que corresponde ao processo pelo qual a informação proveniente do computador é convertida em informação apropriada para actuar em diversos equipamentos de controlo

Na Figura 3.22 apresentam-se os elementos funcionais de um sistema de aquisição automática. Nela estão evidenciados os sensores e transdutores, os cabos de ligação, o condicionamento de sinal, o equipamento de aquisição, e finalmente o computador com o respectivo software de aquisição.



Figura 3.22: Esquema funcional de um sistema de aquisição automática baseado num computador pessoal [Serrano *et. al.*, 2004]

Os sensores e transdutores fornecem a ligação directa entre o mundo real e o sistema de aquisição de dados, convertendo sinais de grandezas físicas em sinais eléctricos.

Os cabos de ligação representam a ligação física entre os transdutores e os sensores até aos condicionadores de sinais e/ou equipamentos de aquisição de dados.

Os sinais eléctricos gerados nos sensores e transdutores muitas vezes necessitam de ser convertidos numa forma apropriada para o equipamento de aquisição. Esta conversão é assegurada pelos condicionadores de sinal. As suas principais tarefas são: filtragem, amplificação, linearização, isolamento e alimentação.

O equipamento de medição é responsável pelas entradas e saídas de sinais nas cadeias de medida, convertendo o sinal analógico em sinal digital ou o inverso, conforme for pretendido.

Finalmente, o software de medição, instalado no computador, transforma o sistema numa aquisição completa de dados, visualização e controlo de sistemas.

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois tipos distintos de sistemas de aquisição automática.

Para os sensores de corda vibrante e os sensores de resistência eléctrica tipo Carlson, utilizou-se um único sistema com a capacidade de interrogar e posteriormente reunir os valores destes dois tipos de extensómetros, independentemente dos seus modos de funcionamento e das suas marcas. Foi utilizado o sistema da marca *Datataker* (home.datataker.com) visto ser um dos mais divulgados no mercado e com maior experiência de utilização no LNEC.

Para os sensores de fibra óptica foi utilizado o sistema de aquisição BraggSCOPE da *Fibersensing* (www.fibersensing.com), destinado unicamente à leitura de aparelhos de fibra óptica.

Nos pontos seguintes, faz-se uma descrição breve destes dois tipos de equipamentos.

3.8.2. Datataker

Um *Delogger* (Figura 3.23) é um instrumento electrónico que, conectado a um determinado tipo de sensor, tem como o objectivo a aquisição e o armazenamento de informação. Estes equipamentos permitem igualmente a leitura quase simultânea de diversos tipos de sensores, com cadências de aquisição independentes. Se necessário, definem condições de alarme podendo enviar mensagens de aviso. Existe ainda a possibilidade de estabelecer ligações remotas, permitindo a recolha de dados assim como a alteração e envio de programas.



Figura 3.23: Equipamento *dataTaker* DT515

Refira-se igualmente que estas unidades de aquisição apresentam uma frequência de aquisição limitada, não sendo possível a realização de uma análise dinâmica (não relevante para os ensaios efectuados).

Os sinais dos sensores são transferidos através de fios condutores ao equipamento de aquisição que os condicionam amplificam, medem e armazenam, ou, como referido anteriormente, emitem toda a informação até ao local desejado. Ao introduzir as curvas de calibração de cada sensor o equipamento regista directamente o valor da mensuranda calculada a partir do sinal de medição.

Estas unidades têm dezasseis canais, sendo possível realizar uma multiplexagem acoplado um outro instrumento, podendo desta forma alcançar os 320 canais. É um método muito utilizado visto que diminui consideravelmente o preço por canal.

Os dados recolhidos por este tipo de instrumentos são posteriormente transferidos para uma unidade PC, onde podem ser interpretados e tratados.

Existem já unidades mais modernas, a série DT80, com mais funcionalidades, especialmente em termos de comunicação.

3.8.3. Braggscope

Sendo a fibra óptica uma tecnologia relativamente recente, as unidades de aquisição sofreram um grande desenvolvimento num curto espaço de tempo. As primeiras unidades apresentavam vários inconvenientes que têm vindo a ser colmatados com o desenvolvimento desta tecnologia, como a dimensão e fragilidade, entre outros.

A unidade de leitura utilizada nos ensaios (Figura 3.24) não necessita de qualquer outro aparelho externo. De facto, funciona como uma unidade portátil que permite não só recolher dados como analisá-los *in situ*, não necessitando de qualquer computador auxiliar. Em termos de capacidade, esta unidade é munida de quatro entradas ópticas que nos permitem ligar um máximo de 16 sensores. Contudo, existem unidades de aquisição para fibra óptica apropriadas para a utilização em “campo”, com um preço mais reduzido, um maior número de canais, podendo definir condições de alarme, enviar mensagens de aviso, estabelecer ligações remotas, permitindo assim a recolha de dados assim como a alteração e envio de programas.



Figura 3.24: Equipamento *BraggSCOPE* portátil

Como referido anteriormente para os instrumentos da *Dataker*, também a tecnologia óptica oferece a possibilidade de se poder acoplar um outro instrumento de forma a se multiplicar o número de canais, permitindo chegar a um máximo de 128 canais, que mais uma vez reduz o preço por canal.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1. Resultados dos ensaios de resistência à compressão

De seguida serão apresentados os resultados dos ensaios de rotura efectuados com os provetes cúbicos.

A cada idade, aos 7, 28 e 90 dias, foram levados à rotura três provetes cúbicos. A partir dos resultados individuais foi calculado o valor médio de tensão de rotura f_{cm} , para cada tipo de betão.

Os valores foram validados confrontando com os obtidos através do anexo B da Norma Portuguesa NP EN 206-1 2007 [IPQ, 2007] (Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3).

Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cubos de betão de pontes

Idade [dias]	f_{ci} [MPa]			f_{cm} [MPa]	f_{ck} [MPa]
	cubo 1	cubo 2	cubo 3		
7	55,2	57,9	54,7	55,9	53,1
28	63,5	64,0	62,3	63,3	61,5
90	68,3	66,3	70,0	68,2	65,2

Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cubos de betão de barragens

Idade [dias]	f_{ci} [MPa]			f_{cm} [MPa]	f_{ck} [MPa]
	cubo 1	cubo 2	cubo 3		
7	26,2	25,8	23,4	25,1	22,6
28	37,2	36,4	34,3	36,0	33,5
90	47,4	49,6	50,8	49,3	46,4

A tensão característica é calculada através da fórmula,

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \cdot S_n \quad (19)$$

sendo,

S_n o desvio padrão das resistências das amostras;

Tabela 4.3: Critérios de identidade para a resistência a compressão

Número "n" de resultados de ensaio da resistência à compressão do volume de betão em causa	Critério 1	Critério 2
	Média de "n" resultados (f_{cm}) N/mm ²	Qualquer resultado individual (f_{ci}) N/mm ²
1	Não aplicável	$\geq f_{ck} - 4$
2-4	$\geq f_{ck} + 1$	$\geq f_{ck} - 4$
5-6	$\geq f_{ck} + 2$	$\geq f_{ck} - 4$

Os resultados respeitam os critérios 1 e 2 da referida norma. Conclui-se que às diferentes idades e para os diferentes tipos de betão, os resultados se encontram validados.

No gráfico 4.1 pode observar-se a evolução da tensão de rotura média à compressão em função do tempo, para os dois tipos de betão.

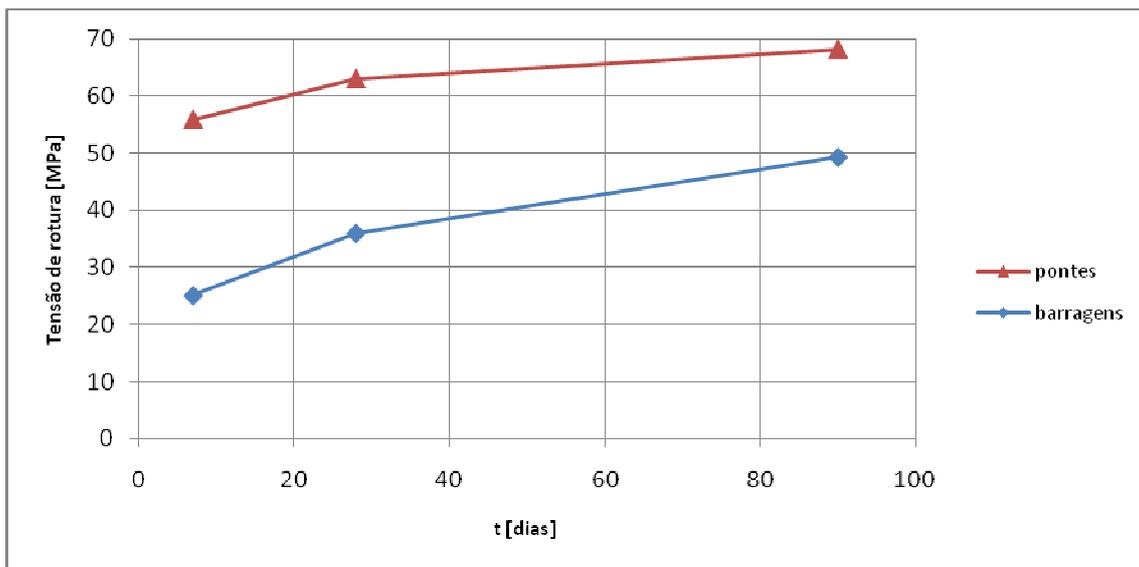


Gráfico 4.1: Evolução da tensão média de rotura em função do tempo

Como seria expectável, verifica-se que o betão de pontes apresenta sempre uma maior tensão média de rotura. É igualmente perceptível que existe um maior aumento da tensão de rotura entre as idades 28 e 90 dias para o betão de barragens, em comparação com o betão de pontes, cuja resistência praticamente estabiliza.

Estas diferenças são devidas à composição de cada tipo betão (§ 3.1).

4.2. Resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade

Como descrito no §3.7.3, para a comparação do desempenho dos vários sensores, foram utilizados os resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade, cuja mensuranda é a extensão.

Nos gráficos apresentados neste ponto, serão expostos os valores médios das diferenças de extensão para cada provete, obtidos através da leitura no sensor embebido e da leitura dos deflectómetros. Os valores referentes à totalidade dos ensaios apresentam-se no Anexo C.

O objectivo será identificar as diferenças entre os resultados do sensor embebido e do deflectómetro, para se poder posteriormente comparar o desempenho dos vários tipos de sensores.

Assuma-se assim que os valores fornecidos pelo deflectómetro representam a leitura de referência das variações de extensão, de forma a ser possível estabelecerem-se comparações entre os vários tipos de sensores.

4.2.1. Betão de pontes

Na Tabela 4.4 apresentam-se as tensões máximas e mínimas aplicadas nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade, calculadas através dos ensaios de resistência à compressão, para o betão de pontes.

Tabela 4.4: Valores de tensões máximas e mínimas aplicadas nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade às diferentes idades, betão de pontes

Tensão [MPa]	Idade [dias]		
	7	28	90
σ_{\max}	12,5	17,8	19,3
σ_{\min}	0,6	0,6	0,6

Na Tabela 4.5 apresentam-se os valores das variações de extensão medidas nos ensaios referidos anteriormente. Para cada provete, apresentam-se os valores médios no sensor

embebido e os valores médios nos deflectómetros, bem como as respectivas diferenças, em percentagem.

Tabela 4.5: Valores de extensão para o betão de pontes

Proverte e técnica de medição		7 dias		28 dias		90 dias	
		$\Delta\varepsilon_{med}$ [$\mu\varepsilon$]	diferença [%]	$\Delta\varepsilon_{med}$ [$\mu\varepsilon$]	diferença [%]	$\Delta\varepsilon_{med}$ [$\mu\varepsilon$]	diferença [%]
CV-BP-1	sensor de corda vibrante	-349.3	2.9%	-477.9	-0.6%	-497.7	-1.6%
	deflectómetro	-339.6		-480.7		-505.6	
CV-BP-2	sensor de corda vibrante	-343.7	12.2%	-483.4	10.2%	-505.2	5.9%
	deflectómetro	-306.3		-438.6		-477.2	
CV-BP-3	sensor de corda vibrante	-351.1	5.5%	-483.8	-1.0%	-510.7	-2.7%
	deflectómetro	-332.9		-488.4		-524.9	
FO-BP-1	sensor de fibra óptica	-361.9	12.2%	-507.6	13.2%	-534.4	14.4%
	deflectómetro	-322.5		-448.5		-466.9	
FO-BP-2	sensor de fibra óptica	-351.4	11.6%	-495.4	8.3%	-517.6	9.8%
	deflectómetro	-315.0		-457.5		-471.7	
FO-BP-3	sensor de fibra óptica	-372.7	17.1%	-522.7	16.3%	-528.3	10.0%
	deflectómetro	-318.3		-449.3		-480.2	

Nos Gráficos 4.2 a 4.4 apresentam-se os valores médios das extensões obtidos nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade. São representados os valores de extensão medidos através dos sensores de corda vibrante (barras azuis) e através dos sensores de fibra óptica (barras verdes). Em simultâneo, representam-se os valores lidos com o deflectómetro (barras cinzentas) com cada provete.

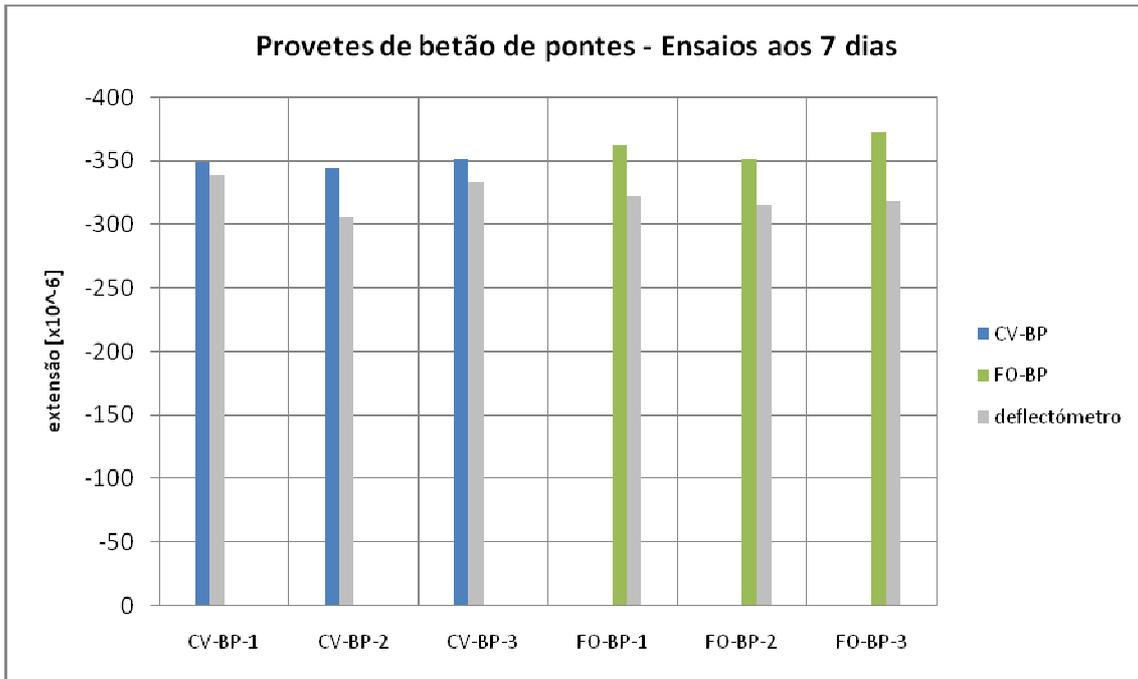


Gráfico 4.2: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de pontes, nos ensaios realizados aos 7 dias

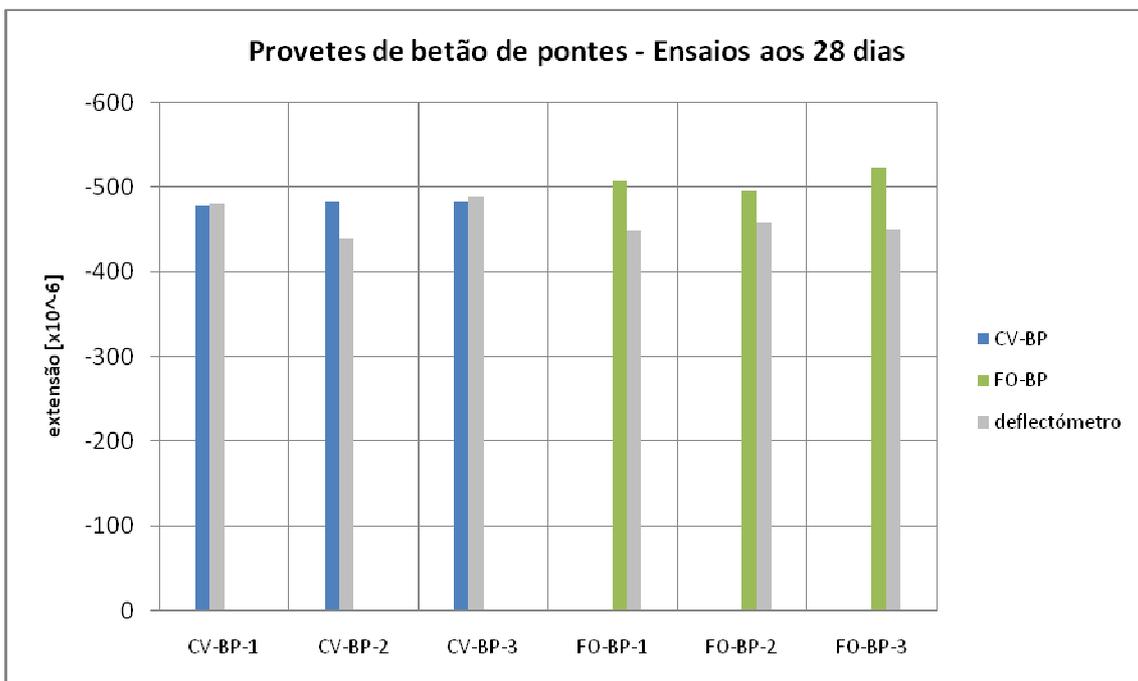


Gráfico 4.3: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de pontes, nos ensaios realizados aos 28 dias

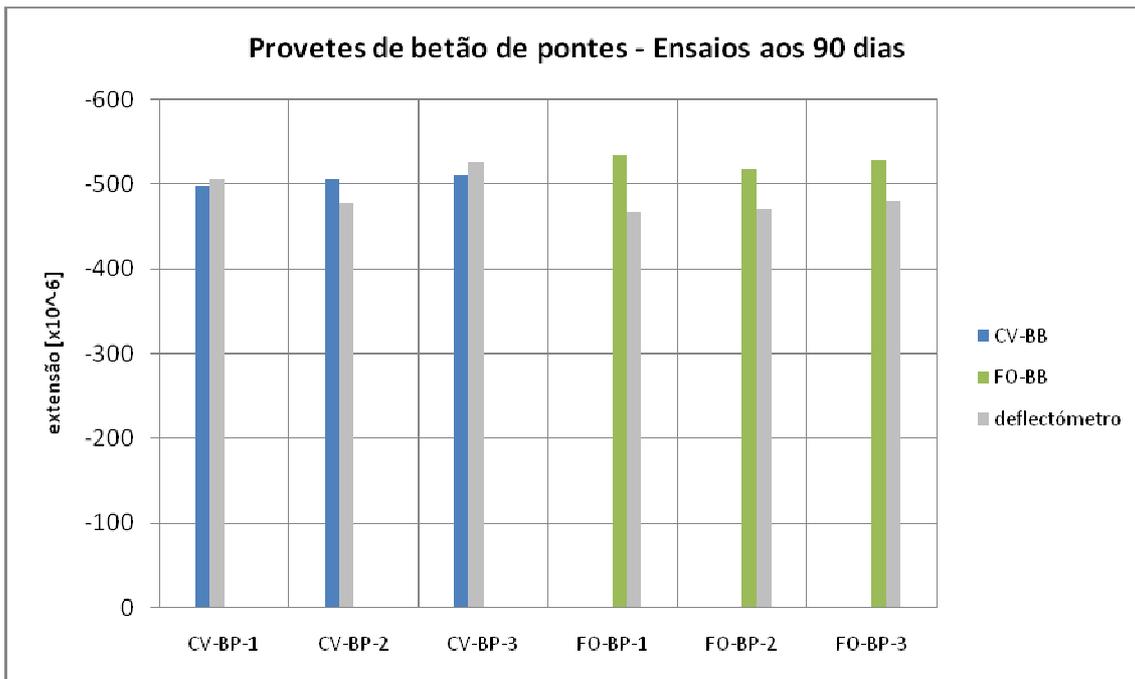


Gráfico 4.4: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de pontes, nos ensaios realizados aos 90 dias

É possível observar, em primeira análise, que a diferença entre os valores obtidos pelos sensores embebidos e pelos deflectómetros de superfície é inferior a 17%, pelo que se pode afirmar que os ensaios decorreram de forma satisfatória, não existindo nenhum valor absurdo, isto é, desenquadrado do esperado.

Pode-se igualmente observar que os valores das extensões correspondentes medidas nos sensores de fibra óptica são sempre superiores, em valor absoluto, aos correspondentes valores medidos através das leituras dos deflectómetros. A mesma tendência não é identificável nos sensores acústicos.

Na Tabela 4.6, apresentam-se as diferenças, em percentagem, entre os valores de extensões obtidos pelos sensores embebidos e pelos deflectómetros de superfície.

Tabela 4.6: Diferenças, em percentagem, das extensões medidas pelos sensores e pelos deflectómetros, nos provetes de betão de pontes

provetes	7 dias	28 dias	90 dias	média absoluta por provete	desvio padrão	média absoluta por tipo de provete
CV-BP-1	2,9%	-0,6%	-1,6%	1,7%	4,2%	4,7%
CV-BP-2	12,2%	10,2%	5,9%	9,4%		
CV-BP-3	5,5%	-1,0%	-2,7%	3,0%		
FO-BP-1	12,2%	13,2%	14,4%	13,3%	2,4%	12,5%
FO-BP-2	11,6%	8,3%	9,8%	9,9%		
FO-BP-3	17,1%	16,3%	10,0%	14,5%		

Da análise da Tabela 4.6 é possível concluir que os sensores de corda vibrante permitem a obtenção de melhores resultados, com desvio de média absoluta de 4,7 %, em comparação com os sensores de fibra óptica, em que esse valor sobe para 12,5%.

Em contrapartida, analisando o desvio padrão dos valores das diferenças, os sensores de fibra óptica apresentam uma menor discrepância, com valores de cerca de 2,4%, quando os sensores de corda vibrante têm um valor de 4,2%.

Por outro lado, seria de esperar que com o aumento da idade e da maturação dos provetes, as diferenças de valores para os vários provetes do mesmo tipo diminuísse, o que não se verifica.

Nos Gráficos 4.5 e 4.6 apresenta-se, a título meramente indicativo, a variação do valor das extensões durante os patamares de carga aplicados aos provetes durante a realização dos ensaios (os casos foram escolhidos aleatoriamente para servirem apenas como exemplo. A totalidade dos ensaios encontra-se no Anexo C).

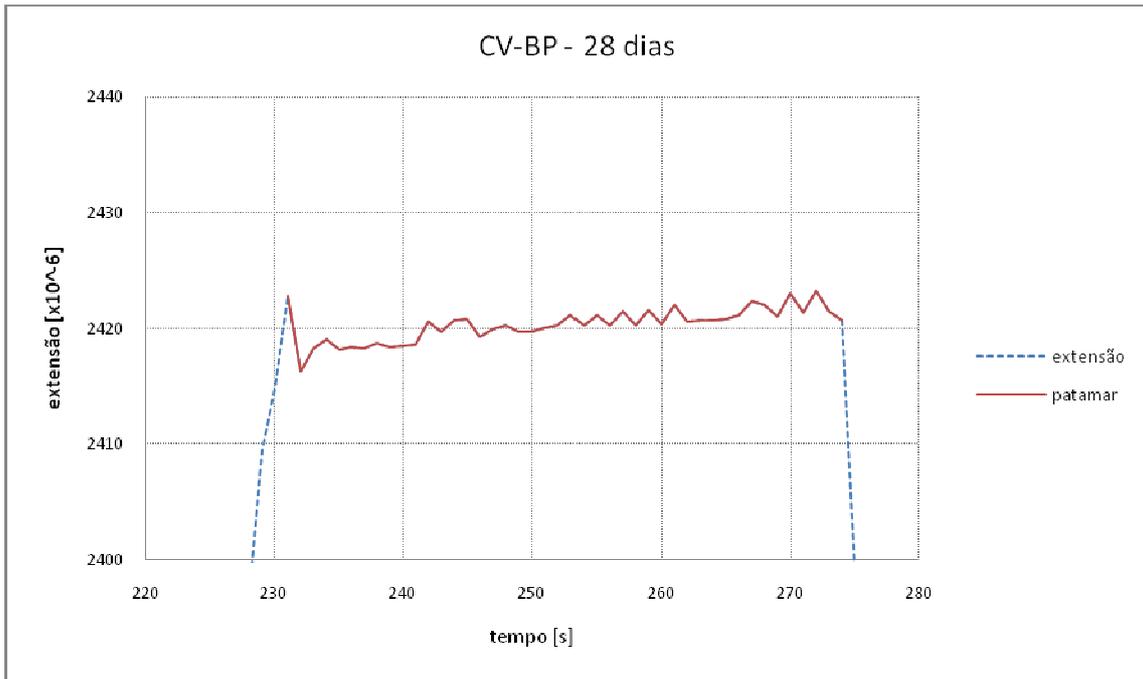


Gráfico 4.5: Representação gráfica das extensões registadas num patamar de carga constante, no caso de um sensor de corda vibrante

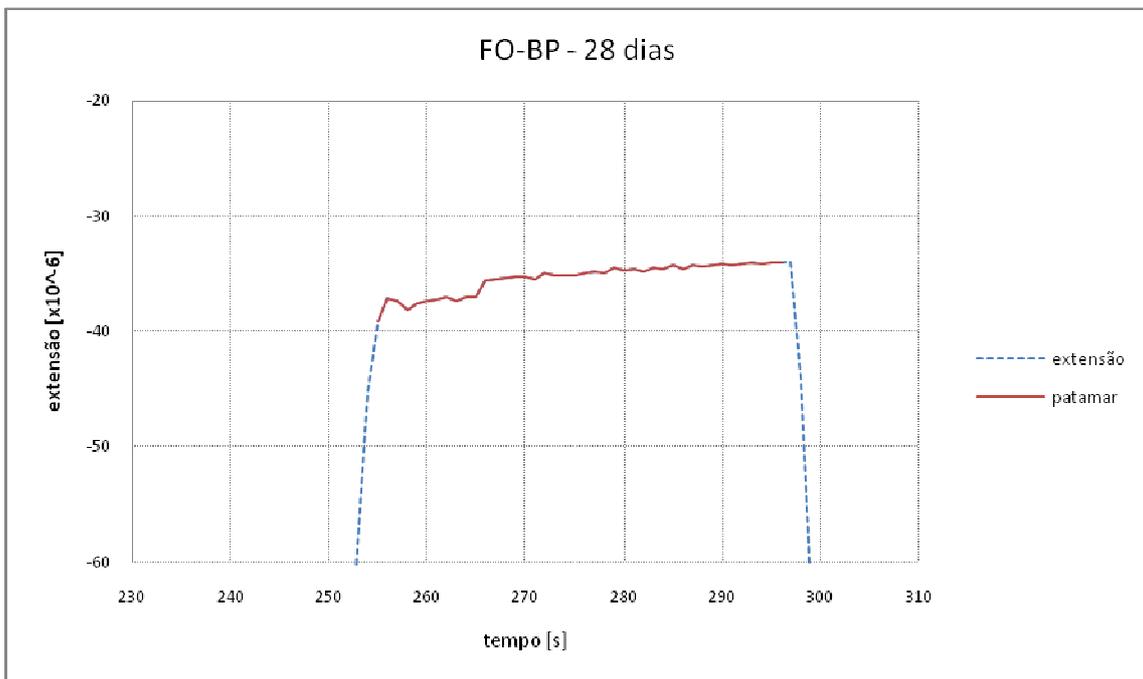


Gráfico 4.6: Representação gráfica das extensões registadas num patamar de carga constante, no caso de um sensor de fibra óptica

Pode notar-se que os sensores de corda vibrante apresentam maiores variações de amplitude, mas apenas de cerca de 5×10^{-6} . Estas variações, denominadas por “ruído”, são quase nulas no caso dos sensores de fibra óptica.

Os sensores de fibra óptica apresentam uma grande estabilidade de medição. Esta característica era já precisada na ficha técnica dos equipamentos [Anexo A].

Na Tabela 4.7 apresentam-se e comparam-se os valores médios do módulo de elasticidade para os vários provetes e para as diferentes idades, considerando os resultados dos sensores embebidos, e os obtidos com os deflectómetros.

Tabela 4.7: Valores do módulo de elasticidade – betão de pontes

Módulo de elasticidade	CV-BP		FO-BP	
E [GPa]	Sensor	Deflectómetro	Sensor	Deflectómetro
7 dias	34,2	36,6	32,9	37,4
28 dias	35,7	36,7	33,8	38,1
90 dias	37,1	37,3	35,5	39,6

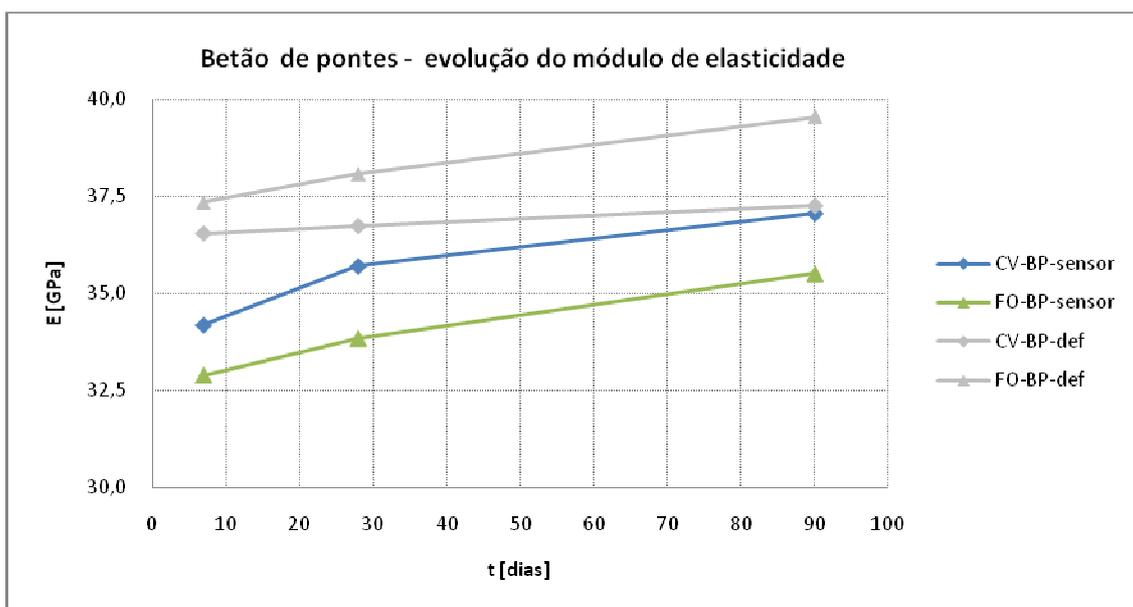


Gráfico 4.7: Representação gráfica da evolução do módulo de elasticidade calculada com os resultados obtidos nos sensores embebidos e nos deflectómetros, para os provetes de betão de pontes

No Gráfico 4.7 verifica-se o mesmo tipo de evolução dos valores médios dos módulos de elasticidade obtidos por meio dos sensores embebidos, sendo que para os sensores de corda vibrante os valores são ligeiramente superiores aos obtidos com os sensores de fibra óptica.

Quanto aos valores médios dos módulos de elasticidade obtidos por meio dos deflectómetros, a evolução verificada é diferente para os provetes contendo sensores de corda vibrante e para os provetes contendo sensores de fibra óptica.

Pode verificar-se ainda que os resultados obtidos por meio dos sensores embebidos são sempre inferiores aos resultados obtidos por meio dos deflectómetros.

4.2.2. Betão de barragens

Na Tabela 4.8 apresentam-se as tensões máximas e mínimas aplicadas nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade, calculadas através dos ensaios de resistência à compressão, para o betão de barragens.

Tabela 4.8: Valores de tensões máximas e mínimas aplicadas nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade às diferentes idades, betão de barragens

Tensão [MPa]	Idade [dias]		
	7	28	90
σ_{\max}	8	10,2	10,2
σ_{\min}	0,6	0,6	0,6

Apresenta-se, de seguida, a análise dos resultados obtidos experimentalmente com os provetes de betão de barragens, sendo que neste caso são comparados os sensores tipo Carlson com os sensores de fibra óptica.

Na Tabela 4.9 apresentam-se os valores das variações de extensão medidas nos ensaios para determinação do módulo de elasticidade.

Para cada provete apresentam-se os valores medidos através do sensor embebido e assim dos deflectómetros, bem como as respectivas diferenças, em percentagem.

Tabela 4.9: Valores de extensão para o betão de barragens

Provete e técnica de medição		7 dias		28 dias		90 dias	
		$\Delta\epsilon_{med}$ [$\mu\epsilon$]	Diferença [%]	$\Delta\epsilon_{med}$ [$\mu\epsilon$]	Diferença [%]	$\Delta\epsilon_{med}$ [$\mu\epsilon$]	Diferença [%]
CA-BB-1	sensores tipo Carlson	-329,4	-6,7%	-334,2	-10,1%	-288,1	-12,4%
	deflectómetro	-353,1		-371,6		-329,0	
CA-BB-2	sensores tipo Carlson	-352,1	0,1%	-364,5	-2,0%	-329,3	-2,6%
	deflectómetro	-351,8		-372,0		-338,1	
CA-BB-3	sensores tipo Carlson	-348,7	5,8%	-371,0	4,6%	-327,1	1,0%
	deflectómetro	-329,5		-354,8		-323,9	
FO-BB-1	sensor de fibra óptica	-269,7	-4,7%	-302,4	-2,6%	-286,8	0,5%
	deflectómetro	-283,1		-310,6		-285,2	
FO-BB-2	sensor de fibra óptica	-255,7	-9,3%	-293,6	-6,9%	-262,2	-10,2%
	deflectómetro	-281,8		-315,3		-292,1	
FO-BB-3	sensor de fibra óptica	-242,2	-17,9%	-273,5	-14,7%	-255,7	-14,6%
	deflectómetro	-295,1		-320,5		-299,4	

Nos Gráficos 4.8 a 4.10 apresentam-se os valores médios de extensões obtidas nos ensaios para determinação do módulo de elasticidade, para os provetes de betão de barragens.

São representados, com barras amarelas, os valores dos sensores tipo Carlson e, com barras verdes, os valores dos sensores de fibra óptica. Em simultâneo, com barras cinzentas, representam-se os valores lidos com deflectómetros.

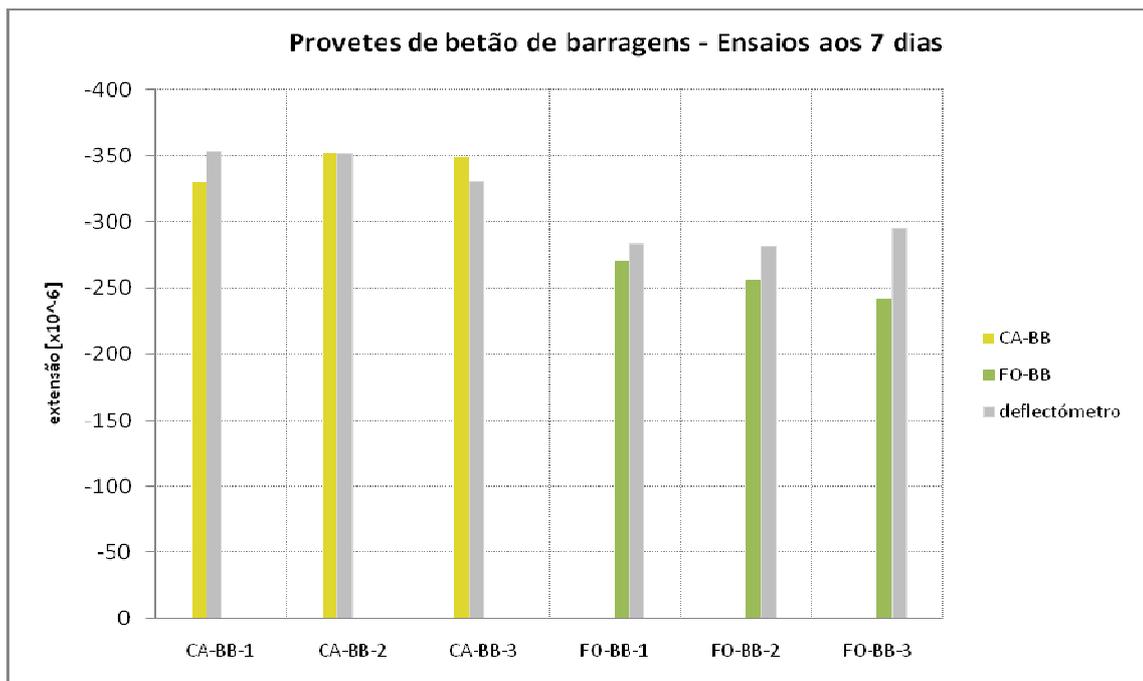


Gráfico 4.8: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de barragens, nos ensaios realizados aos 7 dias

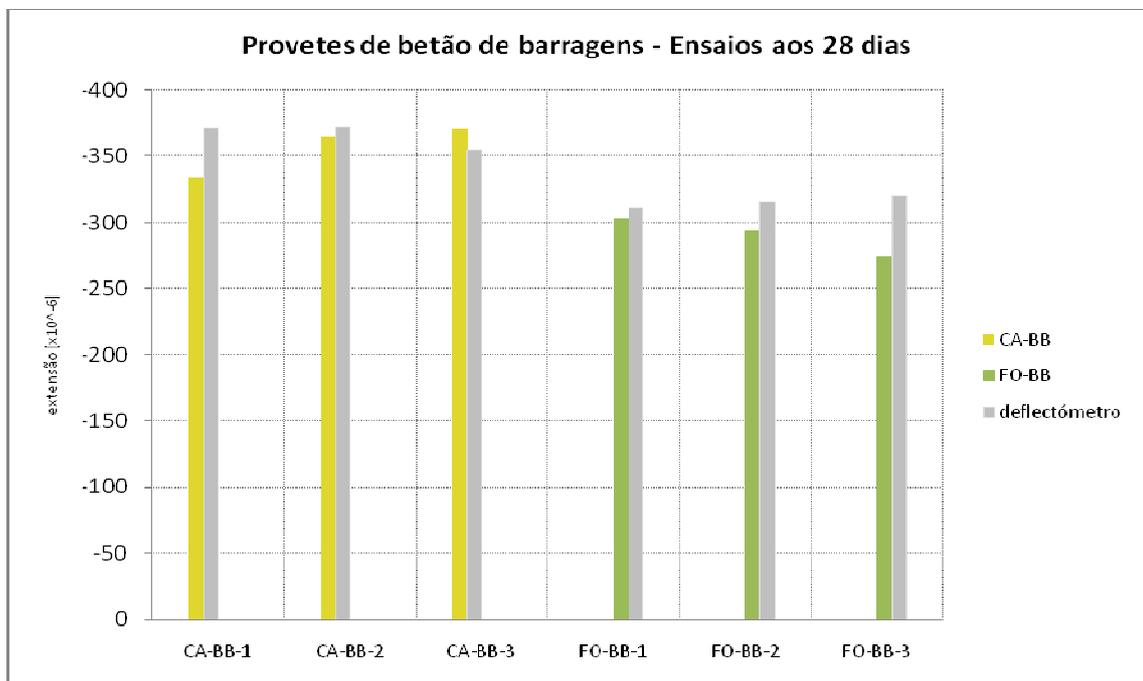


Gráfico 4.9: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de barragens, nos ensaios realizados aos 28 dias

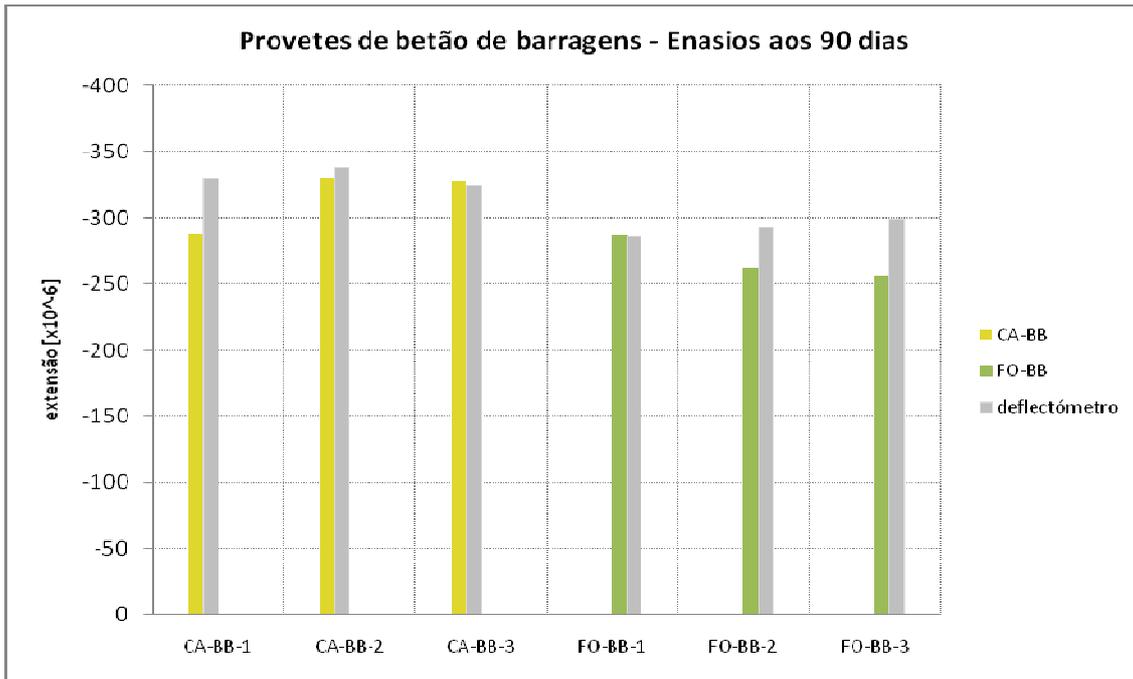


Gráfico 4.10: Valores das extensões médias medidas nos provetes de betão de barragens, nos ensaios realizados aos 90 dias

Voltou constatar-se que as diferenças entre os valores medidos pelos sensores embebidos e com os deflectómetros de superfície é inferior a 15%, excepto num caso onde esse valor atinge os 18%, pelo que se pode considerar que os ensaios decorreram, em geral, de forma satisfatória.

Excepto o provete FO-BB-1, no ensaio aos 90 dias, em que a extensão medida pelo sensor embebido é maior que a medida pelo deflectómetro, constata-se que os sensores de fibra óptica apresentam um valor de extensão sempre menor que a obtida com os deflectómetros, ao contrário do que acontece nos provetes de betão de pontes. Quanto aos sensores tipo Carlson, não é identificável qualquer tendência.

Na Tabela 4.10 apresentam-se as diferenças, em percentagem, entre os valores de extensões obtidos pelos sensores embebidos e pelos deflectómetros.

Tabela 4.10: Diferenças, em percentagem, das extensões medidas pelos sensores e pelos deflectómetros, nos provetes de betão de barragens

Provetes	7 dias	28 dias	90 dias	Média absoluta por provete	Desvio padrão	Média absoluta por tipo de provete
CA-BB-1	-6,7%	-10,1%	-12,4%	9,7%	4,2%	5,0%
CA-BB-2	0,1%	-2,0%	-2,6%	1,6%		
CA-BB-3	5,8%	4,6%	1,0%	3,8%		
FO-BB-1	-4,7%	-2,6%	0,5%	2,6%	6,6%	9,1%
FO-BB-2	-9,3%	-6,9%	-10,2%	8,8%		
FO-BB-3	-17,9%	-14,7%	-14,6%	15,7%		

A análise da Tabela 4.10 permite concluir que os sensores tipo Carlson apresentam um melhor desempenho que os sensores de fibra óptica. A média absoluta das diferenças é de 5,0 % para os sensores tipo Carlson e de 9,0 % para os sensores de fibra óptica, sendo o desvio padrão de 4,2% para os primeiros, e de 6,6 % para os segundos.

Nos Gráficos 4.11 e 4.12 apresenta-se, a título meramente indicativo, a variação do valor das extensões durante os patamares de carga constante aplicados aos provetes durante a realização dos ensaios (os casos foram escolhidos aleatoriamente para servirem apenas como exemplo. A totalidade dos ensaios encontra-se no Anexo C).

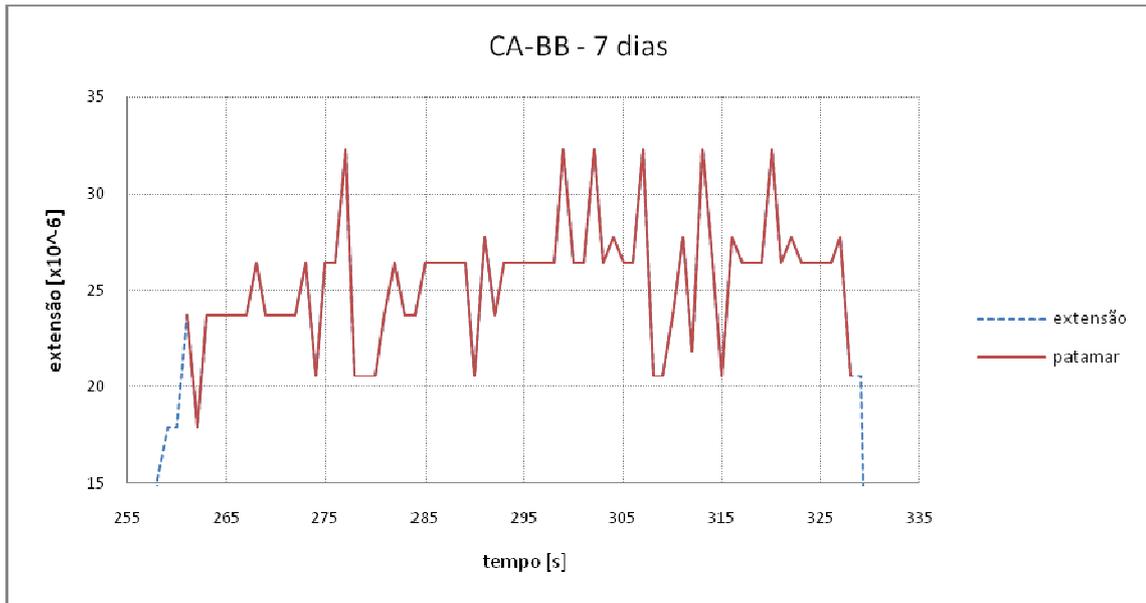


Gráfico 4.11: Representação gráfica das extensões registadas num patamar de carga constante, no caso de um sensor de resistência eléctrica tipo Carlson

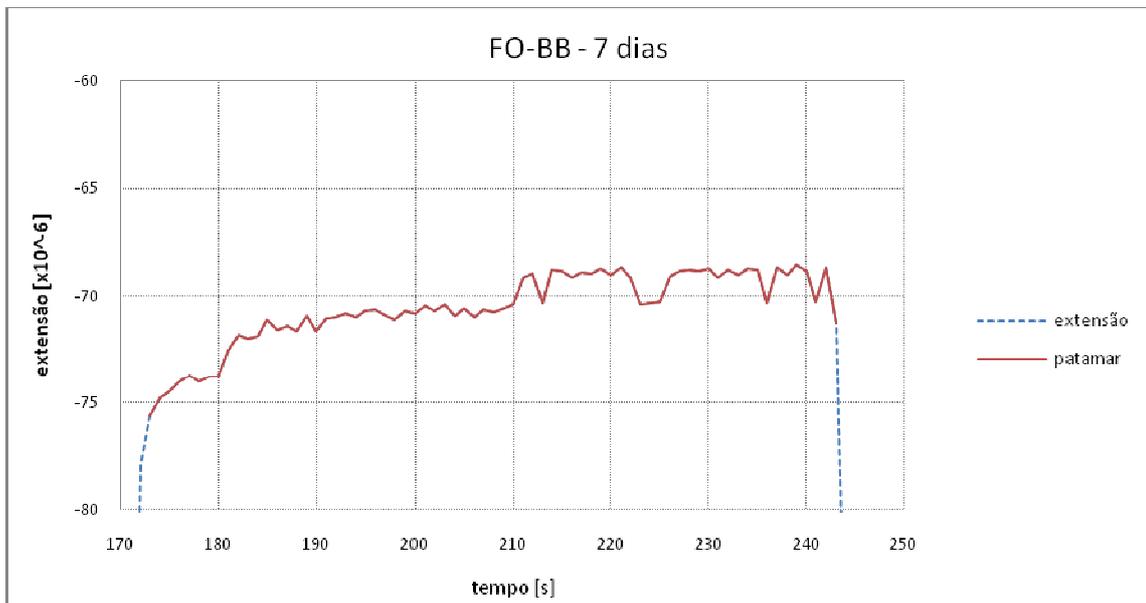


Gráfico 4.12: Representação gráfica das extensões registadas num patamar de carga constante, no caso de um sensor de fibra óptica

Pela análise dos gráficos é possível notar que os sensores de fibra óptica apresentam uma menor variação de amplitude, em comparação com os sensores tipo Carlson. Mais uma vez se conclui que os sensores de fibra óptica apresentam uma maior estabilidade de leitura.

Na Tabela 4.11 apresentam-se os valores dos módulos de elasticidade e no gráfico 4.13 representa-se a sua evolução no tempo.

Tabela 4.11: Valores do módulo de elasticidade – betão de barragens

Módulo de elasticidade	CA-BB		FO-BB	
	Sensor	Deflectómetro	Sensor	Deflectómetro
7 dias	21,6	22,7	7 dias	21,6
28 dias	27,0	26,2	28 dias	27,0
90 dias	30,6	29,1	90 dias	30,6

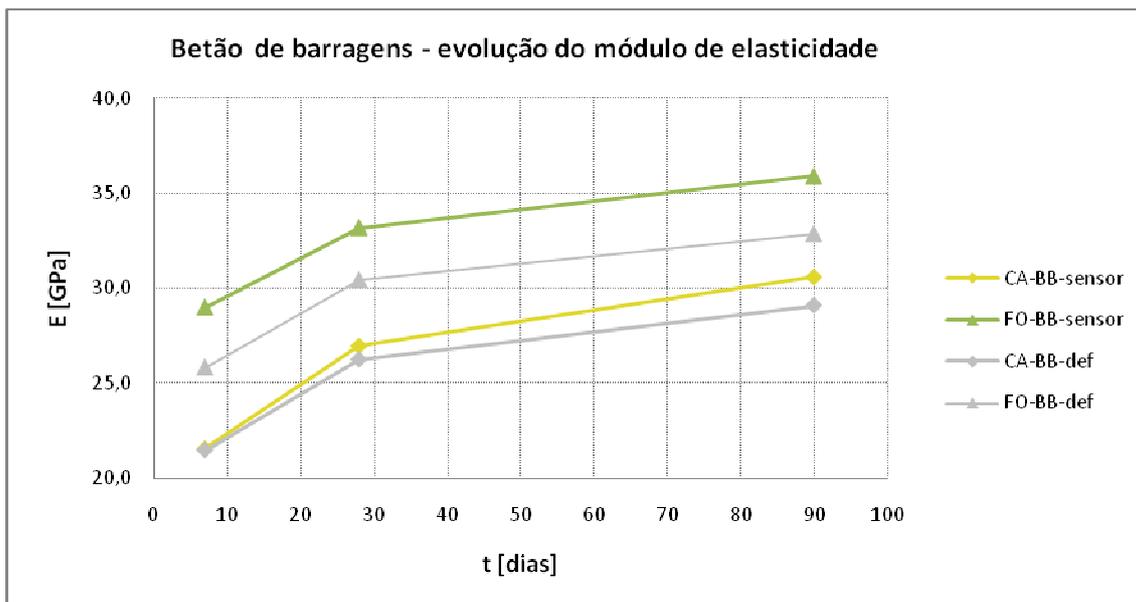


Gráfico 4.13: Representação gráfica da evolução do módulo de elasticidade calculada com os resultados obtidos nos sensores embecidos e nos deflectómetros, para provetes de betão de barragens

Da análise do gráfico 4.13 pode concluir-se que, contrariamente ao sucedido para os provetes de betão de pontes, a evolução do módulo de elasticidade é idêntica, quando calculada a partir de resultados dos sensores embebidos e dos deflectómetros.

Pode verificar-se ainda que os provetes CA-BB apresentam valores médios de módulos de elasticidade sempre inferiores aos provetes FO-BB.

4.3. Resultados de leituras para determinação da retracção

Apresentam-se, de seguida, os resultados das extensões medidas ao longo do tempo, devidas à retracção dos provetes (§ 3.7.3).

4.3.1. Betão de pontes

Nos Gráficos 4.14 e 4.15 apresentam-se os valores medidos nos sensores embebidos nos provetes de betão de pontes, nos noventa dias do ensaio.

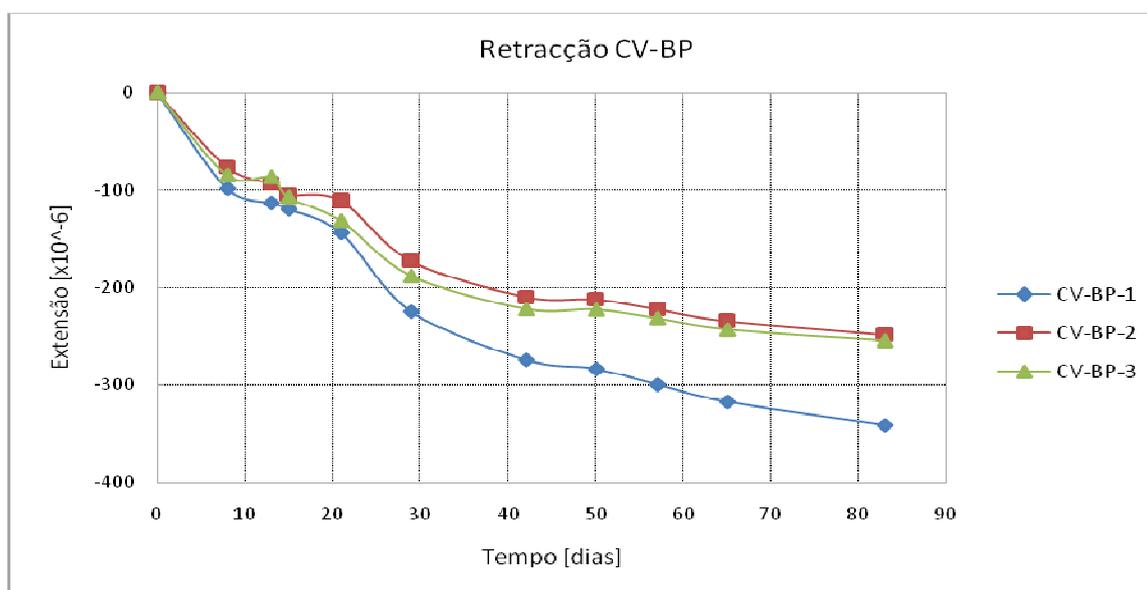


Gráfico 4.14: Evolução da extensão da retracção nos provetes de betão de pontes com sensores de corda vibrante

Da análise do Gráfico 4.14 é possível notar que todos os sensores de corda vibrante registam o mesmo tipo de evolução ao longo do tempo, sendo que o provete CV-BP-1 apresenta valores bastante superiores aos outros dois, sobretudo a partir do 25º dia. Aos 90 dias essa diferença atinge um valor de cerca de 100×10^{-6} (27,4% a mais que os restantes).

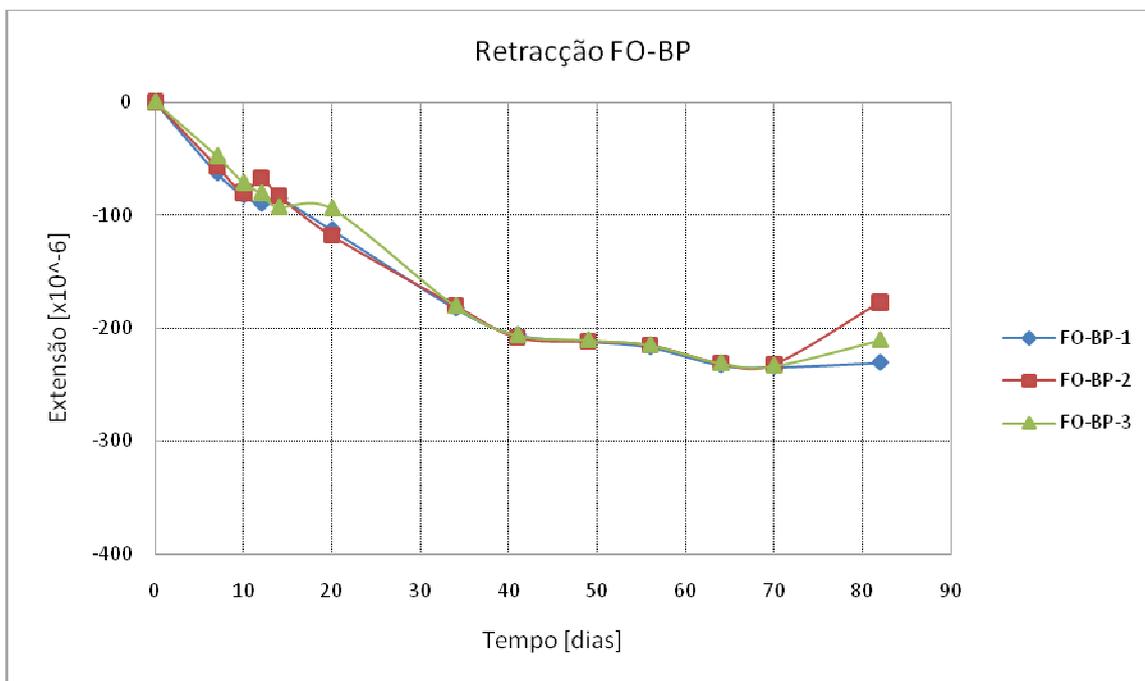


Gráfico 4.15: Evolução da extensão da retracção nos provetes de betão de pontes com sensores fibra óptica

Verifica-se uma grande semelhança de valores lidos através dos sensores de fibra óptica até aos 70 dias, divergindo ligeiramente a partir daí. Isto deve-se à utilização de uma unidade de aquisição diferente (Braggmeter) na última leitura dos sensores de fibra óptica. Esta unidade interrogadora permite atingir grandes frequências de amostragem (ideal para análises dinâmicas), mas não será a mais aconselhável para o tipo de ensaios realizados no presente trabalho.

No Gráfico 4.16 apresentam-se os valores médios obtidos nos sensores acústicos (a azul) e ópticos (a verde), comparando-os com os valores de retracção calculados através da Norma Portuguesa NP EN 1992-1-1 2010 [IPQ, 2010] (a vermelho).

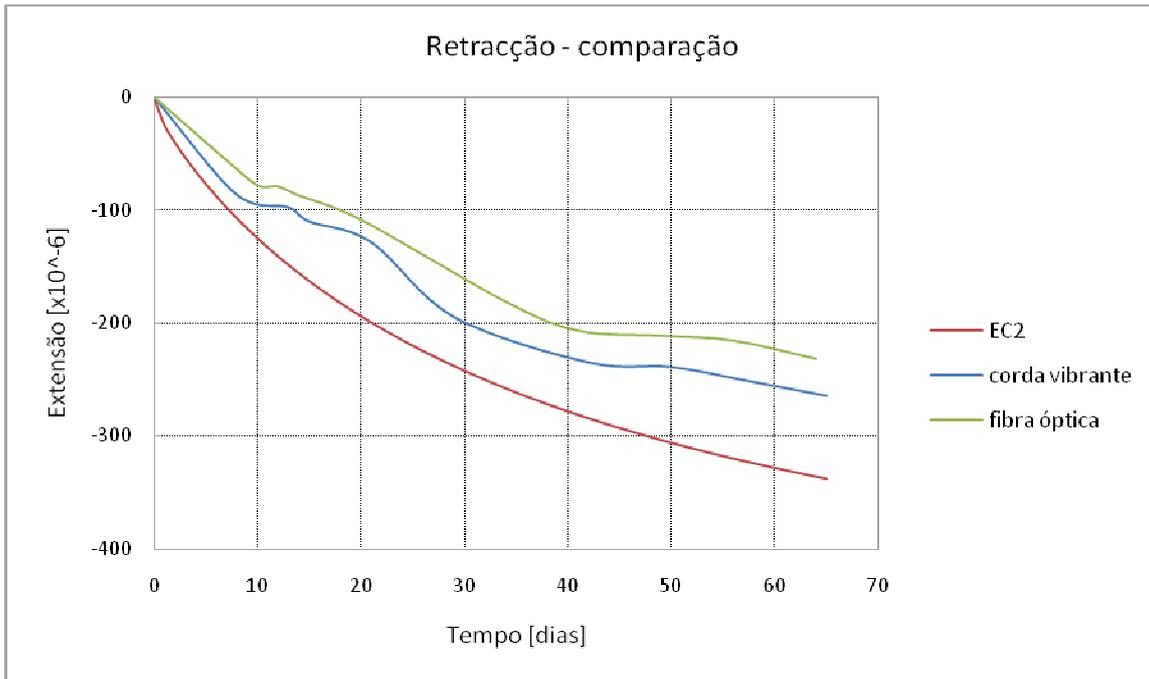


Gráfico 4.16: Extensões médias de retracção medidas nos provetes de betão de pontes e calculadas pelo EC2

Pode-se observar que todas as curvas apresentam um andamento relativamente similar. Quanto aos valores medidos das extensões, estes são consideravelmente diferentes dos valores calculados através do Eurocódigo. As diferenças podem não justificar-se, qualitativamente, pelas condições de cura e de endurecimento dos provetes que são mais desfavoráveis em obra.

Para a extensão aos 65 dias, os sensores acústicos divergem de 22% do valor teórico, valor esse que aumenta para 32% para os sensores ópticos.

4.3.2. Betão de barragens

No Gráfico 4.17 apresentam-se as extensões de retracção medidas nos provetes de betão de barragens com os extensómetros de resistência eléctrica tipo Carlson, referindo-se o Gráfico 4.18 às medições realizadas com os sensores de fibra óptica.

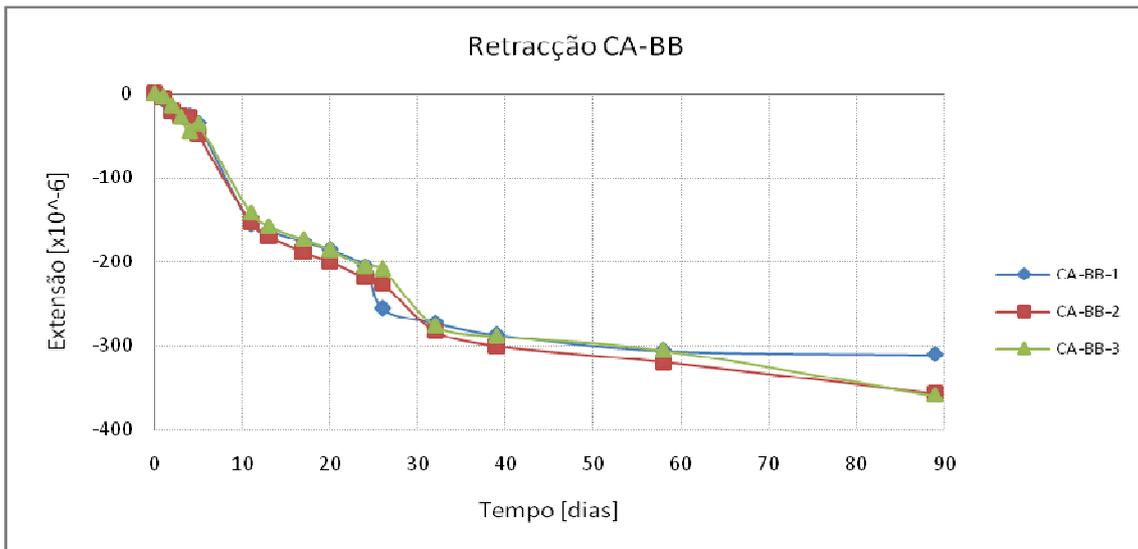


Gráfico 4.17: Evolução da extensão da retracção nos provetes de betão de barragens com sensores de resistência eléctrica tipo Carlson

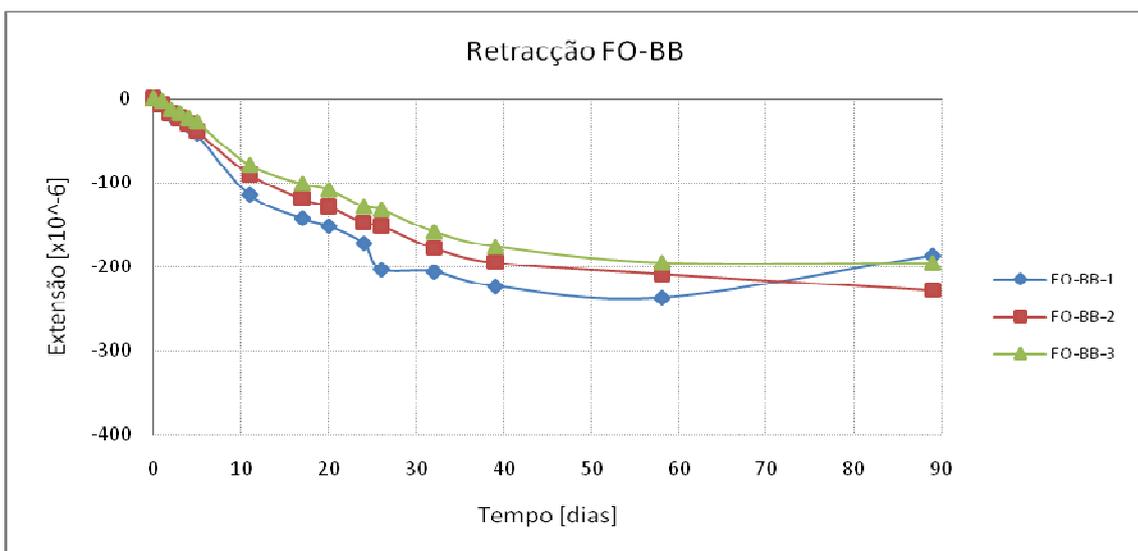


Gráfico 4.18: Evolução da extensão da retracção nos provetes de betão de barragens com sensores de fibra óptica

Analisando o Gráfico 4.17, pode observar-se que os sensores tipo Carlson apresentam uma grande uniformidade de leituras.

A retracção do betão de barragens, avaliada através de sensores de fibra óptica, apresenta duas fases distintas. Inicialmente, até aos 20 dias, todos os sensores apresentam leituras semelhantes. A partir daí, os valores passam a apresentar diferenças, embora a tendência seja semelhante. Parece ter ocorrido um erro na última leitura feita no sensor FO-BB-1, visto que extensão diminuiu significativamente em relação a leitura anterior.

No Gráfico 4.19 apresentam-se as extensões médias de retracção medidas nos provetes e as estimadas pelo EC2.

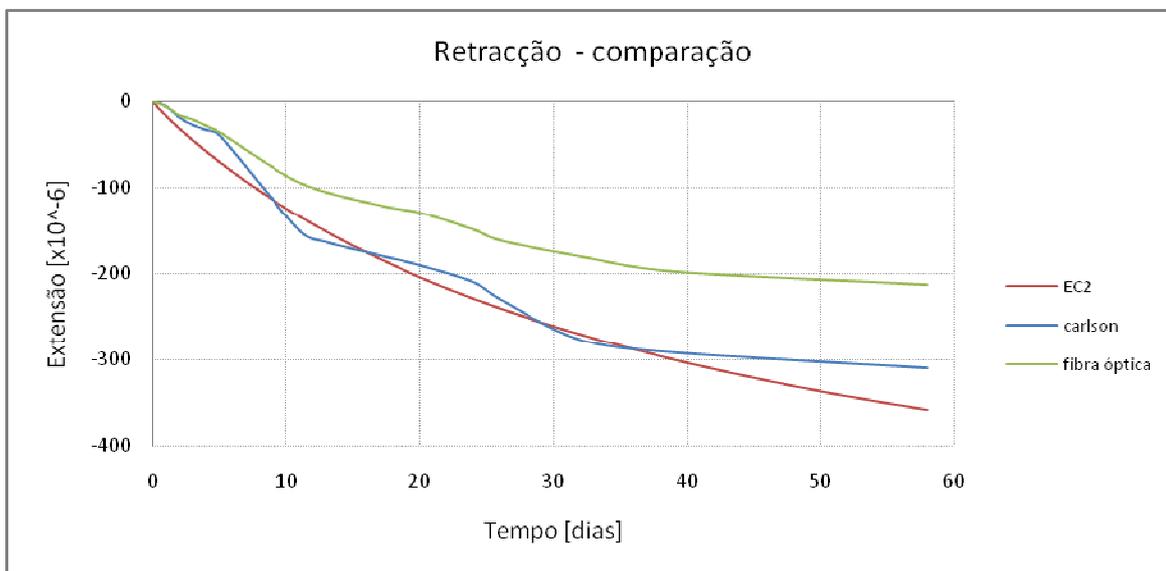


Gráfico 4.19: Extensões médias de retracção medidas nos provetes de betão de barragens e calculadas pelo EC2

Pode notar-se que todas as curvas apresentam um andamento similar. Os valores obtidos com os sensores tipo Carlson são próximos do valor teórico nas primeiras idades, mas divergem ligeiramente com a idade. Os valores médios medidos com os sensores de fibra óptica são sempre menores que os restantes, aumentando a divergência com a idade.

Para a extensão aos 60 dias, os sensores tipo Carlson diferem de 14% do valor teórico, diferença que aumenta para 40% para os sensores ópticos.

4.4. Análise de custos

Nos pontos anteriores foi analisado o desempenho de alguns tipos de sensores utilizados para a observação de extensões em estruturas de betão.

Como é do conhecimento geral, a vertente económica é um factor preponderante para a escolha entre vários produtos que ofereçam o mesmo tipo de serviço. Deste modo,

apresenta-se uma análise comparativa de custos, com os elementos actuais a que se teve acesso.

Na Tabela 4.12 apresentam-se os preços unitários dos vários equipamentos utilizados na realização do presente trabalho e no Gráfico 4.20 é analisado o custo por canal para cada sensor, utilizando ou não o instrumento expansor.

Tabela 4.12: Preços unitários dos sensores e das respectivas unidades de leituras, em 2011

Equipamento		Custo Unitário
Sensor	Corda vibrante	111,8 €
	Carlson	600,0 €
	Fibra óptica	295,0 €
Unidade de leitura	DT85G	3.751,0 €
	braggmeter SS2200	9.900,0 €
Expansores	DT85G (20 canais)	749,0 €
	braggmeter SS2200 (32 canais)	22.500,0 €

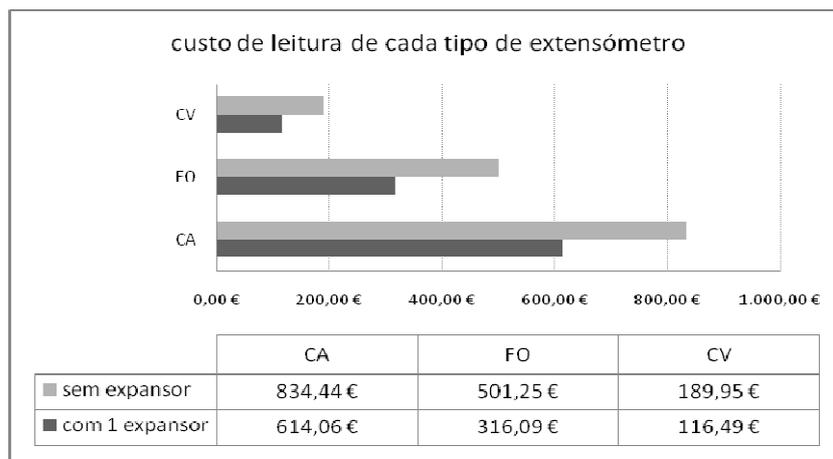


Gráfico 4.20: Representação gráfica do preço por canal da unidade de leitura

Os custos de leitura de cada tipo extensómetro foram calculados da seguinte forma,

$$C_1 = C_{\text{sensor}} + \frac{C_{\text{unidade aquisição}}}{n_{\text{canais}}} \quad (20)$$

$$C_2 = C_{\text{sensor}} + \frac{C_{\text{unidade aquisição}} + C_{\text{expansor}}}{n_{\text{canais}}} \quad (21)$$

sendo,

C_1 o custo de leitura de um sensor sem unidade expansora;

C_2 o custo de leitura de um sensor com unidade expansora;

C_{sensor} o custo do sensor;

$C_{unidade\ aquisição}$ o custo da unidade de aquisição;

$C_{expansor}$ o custo da unidade expansora;

n_{canais} o número de canais disponíveis.

Da análise dos seguintes dados, podemos observar que para os sensores utilizados na observação de pontes, o sensor de corda vibrante, é sem dúvida o mais atractivo do ponto de vista económico, apresentando um preço por canal de unidade de leitura de 189,95€ sem unidade expansora e 116,49€ com a mesma, contra 501,25€ e 316,09€ respectivamente, para os sensores de fibra óptica.

Para os sensores utilizados na observação de barragens, a tendência inverte-se, sendo o sensor de fibra óptica o mais atractivo, apresentando um preço por canal de unidade de leitura de 501,25€ sem unidade expansora e 316,09€ com a mesma, contra 834,445€ e 614,06€ respectivamente, para os sensores tipo Carlon.

4.5. Considerações finais

A realização dos ensaios e análise dos respectivos resultados permitem tirar as conclusões que se apresentam de seguida,

Para o betão de pontes, os sensores acústicos apresentam um melhor desempenho, sendo também os mais atractivos do ponto de vista económico. Quanto aos dispositivos de fibra óptica, apresentam uma grande estabilidade e uma grande uniformidade de resultados, ainda que apresentem uma considerável diferença em relação às extensões medidas através de deflectómetros.

Para o betão de barragens, os extensómetros tipo Carlson apresentam um melhor desempenho mas uma menor estabilidade de leitura e um maior custo, quando comparados com os sensores de fibra óptica. Os dispositivos ópticos voltaram a apresentar uma grande homogeneidade de resultados, embora com diferenças significativas em relação aos valores medidos através de deflectómetros.

A existência de diferenças entre as extensões medidas com sensores ópticos e com os restantes extensómetros poderá ser explicada, eventualmente, pela não adequação dos dispositivos ao tipo de betão ensaiado.

Em relação à tecnologia óptica, constatou-se que ao utilizar duas unidades de aquisição distintas, os valores medidos foram significativamente diferentes. Este facto apresenta uma grande desvantagem em relação aos outros dispositivos de monitorização utilizados, que podem todos ser interrogados por vários modelos.

Com o aumento da experiência de utilização dos sensores de fibra óptica, prevê-se que as lacunas associadas a esta tecnologia venham a ser colmatadas, e que em breve estes sensores possam ser utilizados sem restrições de monta.

Na Tabela 4.13 apresenta-se uma síntese, necessariamente simplificada, das vantagens e desvantagens dos três tipos de sensores analisados no presente trabalho.

Tabela 4.13: Comparação do desempenho dos sensores

Extensómetro de Corda Vibrante		Extensómetro de Fibra Óptica		Extensómetro tipo Carlson	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Desempenho	Não realização de medições dinâmicas	Estabilidade	Custo	Desempenho	Custo
Robustez		Resistência a interferências electromagnéticas	Fragilidade do equipamento	Robustez	Estabilidade
Longevidade		Aquisição em regime dinâmico		Longevidade	
Custo				Aquisição em regime dinâmico	

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de tecnologias arrojadas de construção de grandes estruturas de elevado nível tecnológico foi acompanhado pelo desenvolvimento de instrumentos capazes de as monitorizar.

Este trabalho teve por objectivo testar e avaliar o desempenho de uma destas novas tecnologias, a fibra óptica, comparando-a com métodos tradicionais de medição de extensões.

Tendo em conta esse objectivo, foram planeados e realizados ensaios laboratoriais de forma a poder efectuar tal comparação, com vista a uma possível actualização tecnológica no que diz respeito à instrumentação a realizar pelo LNEC em estruturas de betão de pontes e de barragens.

Os ensaios foram realizados considerando dois tipos distintos de betão, nomeadamente o de pontes, com elevada resistência e rigidez desde as primeiras idades, e o de barragens, com agregados de maior dimensão e menor dosagem de ligante, induzindo menor resistência e maturação mais lenta.

Para este efeito, foram utilizados extensómetros de corda vibrante cujo princípio de funcionamento se baseia nas alterações da frequência de vibração de uma corda tensionada, extensómetros de resistência eléctrica tipo Carlson cujo princípio de funcionamento se baseia nas alterações de resistência de dois elementos resistivos deformados e finalmente extensómetros de fibra óptica cujo princípio de funcionamento se baseia nas alterações das propriedades da luz de materiais deformados.

Foram realizados ensaios em provetes de betão com sensores embebidos de forma a poder comparar o seu desempenho. Considerou-se o ensaio normalizado para determinação do módulo de elasticidade, para medição de extensões instantâneas, e o ensaio para determinação da retracção, para medição de extensões diferidas.

Em relação aos sensores utilizados na monitorização de pontes, concluiu-se que os extensómetros acústicos são os mais atractivos do ponto de vista económico assim como ao nível do desempenho demonstrado, tendo como único inconveniente a não possibilidade da sua utilização para medições dinâmicas. Possuem igualmente uma grande longevidade e existe uma grande experiência na sua utilização. Os sensores de fibra óptica permitiram obter resultados estáveis, ainda que com diferenças relativamente às outras técnicas de medição.

Quanto aos sensores utilizados na monitorização de barragens, os extensómetros de resistência eléctrica tipo Carlson apresentaram, de forma geral, um bom desempenho, assim como uma grande longevidade e robustez, sendo que do ponto de vista económico os sensores de fibra óptica parecem ser mais apelativos, para além de apresentarem uma muito maior estabilidade nas medições medidas num determinado instante.

O tema abordado nesta dissertação está ainda muito longe de ser fechado. A fibra óptica é uma tecnologia que se instalou em todas as disciplinas da engenharia, com resultados muito bons em diversas áreas, nomeadamente nas estruturas de pontes e de barragens.

Num futuro próximo, prevê-se a redução dos custos desta nova tecnologia, assim como a optimização do seu desempenho e da sua utilização.

No seguimento do trabalho desenvolvido, seria interessante a reprodução dos ensaios *in situ*, analisando outras grandezas, assim como o estudo e avaliação do desempenho dos sensores referidos numa análise dinâmica.

Referências Bibliográficas

[Alves, 2007] Alves, J.F.A. - *Monitorização de Estruturas de Engenharia Baseada em Redes de Bragg em Fibra Óptica*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2007.

[Coelho, 2005] Coelho, J.P. - *Sensores e Actuadores – Material de Apoio às Aulas - ver 2.0*. Instituto Politécnico de Bragança – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Portugal, 2004/2005.

[Cooper, 1999] Cooper, D.J.F - *Time Division Multiplexing of a Serial Fibre Optic Bragg Grating Sensor Array*. University of Toronto, Toronto, Canada, 1999.

[Coutinho, 1994] Coutinho, A.S.- *Fabrico e propriedades do betão Volume III*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1994.

[Datataker, 2010] *Powerful Data Logger and Flexible Data Acquisition & Data Logging Systems*, 2010. Disponível na internet em <http://www.datataker.com/acquisition.html> - Arquivo consultado em Agosto 2010.

[DiBiagio, 2003] DiBiagio, E. - *A Case study of Vibrating-Wire Sensors That Have Vibrated Continuously For 27 Years*. Norwegian Geotechnical Institute, Noruega, 2003.

[Félix, 2002] Félix, C.M.S - *Monitorização do Comportamento de Estruturas de Betão*. ISEP, Porto, Portugal, 2002.

[Félix, 2004] Félix, C.M.S - *Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2004.

[Fialho, 1969] Fialho, J. L. - *Análise Experimental de Tensões*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1969.

[Gage Technique, 2010] - *The theory of Vibrating Wire*. Disponível na internet em www.gage-technique.demon.co.uk/support/technotes/instrument-choose.html#spec - Arquivo consultado em Junho 2010.

[Hill, 1978] Hill, K. O., Y. Fujii, D. C. Johnson e B. S. Kawasaki - *Photosensitivity in optical waveguides: application to reflection filter fabrication*. Applied Physics Letters **32** (10): 647-649, 1978.

[IPQ, 2010] *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifícios*. NP EN 1992-1-1 2010, IPQ, 2010.

[IPQ, 2007] *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. NP EN 206-1 2007, IPQ, 2007.

[IPQ, 2009] *Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes*. NP EN 12390-3 2009, IPQ, 2009.

[Lee *et al.*, 2010] Lee, H. M., Kim, J. M., Sho, K., Park, H. S. - *A wireless vibrating wire sensor node for continuous structural health monitoring*. Smart Materials and Structures – Volume 19 – Number 5, 2010.

[Lamond *et al*, 2006] Lamond, J. F., Pielert, J. H. - *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Material*. U.S.A., 2006.

[LNEC, 1993] - *Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão*. Especificação E 397, LNEC, Lisboa, Portugal, 1993.

[Marecos, 2007]. Marecos, V.M.S. - *Controlo da Segurança de Pontes em Tempo Real*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2007.

[Rodellar, 2009] Rodellar, J. - *Structural Health Monitoring – Advanced Course*. Technical University of Catalunya., Barcelona, Spain, 2009.

[Santos, 2002] Santos, L.O. - *Observação e análise do comportamento diferido de pontes de betão* – TPI 20, LNEC , Lisboa, Portugal, 2002.

[Serrano, 2004] Serrano, L. M. V. - *Sistemas de Aquisição, Processamento e Armazenamento de Dados*. 1º Encontro Nacional SPMet, Caparica, Portugal, 2010.

[Silva, 2001] Silva, T. I. - *Desenvolvimento de um Sensor a Corda Vibrante para aplicações em Engenharia de Reabilitação*. II Congresso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, Habana, Cuba, 2001.

[Vardan, 2000] Vardan V.K., Vardan, V.V. – *Microsensors, Microelectromechanical Systems (MEMS) and Electronics for Smart Structures and Systems*. Smart Materials and Structures - Volume 9 – Number 6, 2000.

ANEXOS

ANEXO A

Fichas técnicas dos sensores utilizados

A.1. Extensómetros de corda vibrante



VIBRATING WIRE EMBEDMENT STRAIN GAUGE.



TECHNICAL SPECIFICATION

Gauge Type :	TES/5.5/T embedment strain gauge.
Gauge Length :	5.5 inches.
Gauge factor :	3.025×10^{-3} microstrain per frequency squared.
Measurement range :	Greater than 3000 microstrain.
Resolution :	Better than 1 microstrain.
Coil Resistance :	Approximately 100 ohms.
Operating temperature range :	From -20°C to 80°C .
Thermal coefficient of vibrating wire :	11 ppm per 0°C .
Thermistor temperature sensor :	Optional
Cable diameter :	4.5 millimetres.
Cable colour code – Brown :	Coil +ve.
Blue :	Coil -ve.
Yellow :	Thermistor (optional).
Green :	Thermistor (optional).

The type TES/5.5/T embedment vibrating wire strain gauge for concrete is based on a design by the Road Research Laboratory (now known as the Transport Research Laboratory), that was initially developed in 1969. Gauges of this type have been used successfully, worldwide, for the past 40 years, in major Civil Engineering projects such as the Channel Tunnel Rail Link in the UK & Storæbelt Crossing in Denmark.

Typical applications include pre-cast tunnel linings, concrete bridge sections, dams and concrete creep tests.

The gauges are suitable for long term use, the oldest working examples still in operation are over 30 years old and still providing reliable data!

THE VIBRATING WIRE EQUATION



The change in engineering units, microstrain ($\mu\epsilon$), is given by the following expression :-

$$\mu\epsilon = (F_1^2 - F_2^2) \times GF$$

where: -

F₁ = the initial or Datum frequency reading

F₂ = a subsequent measured frequency

GF = the appropriate Gauge Factor for the gauge.

This equation may be expressed in terms of period reading (T), as displayed by the GT1174 Miniature Strain Meter:

$$\mu\epsilon = \left(\frac{10^{14}}{T_1^2} - \frac{10^{14}}{T_2^2} \right) \times GF$$

T₁ = the initial or Datum period reading

T₂ = a subsequent measured period reading.

Note: A positive change in microstrain indicates a compressive strain change.

MEASUREMENT RANGE AND RESOLUTION

The following table gives typical upper limit, lower limit, mid range values to 5 significant figures, and resolutions in microstrain, for all strain gauges of the same gauge length:

TES/5.5/T						
Gauge Length (GL), 5.5 inches						
Gauge Factor (GF), 3.025e ⁻³ Microstrain per Frequency squared						
	T	F	Lin	Change $\mu\epsilon$	GT1174	GT1192
Upper Limit	08500	1176.5	1384.1	-1489.5	0.98	0.71
Mid Range	10590	944.29	891.68	0.0	0.51	0.06
Lower Limite	16000	625.00	390.63	1515.7	0.15	0.04

NOTES

- The Period (T) is the reading as displayed by the GT1174 Miniature Strain Meter in seconds x 10⁷.
- The Frequency (F) is the reading as displayed by the GT1192/615 Geologger in hertz and is equivalent to 10⁷/T.
- The Linear value (Lin.) is F²/1000 and is equivalent to 10¹¹/T².
- The microstrain Change ($\mu\epsilon$) is derived from the Vibrating Wire Equation.
- The Resolution is given in microstrain. It is the resulting change in microstrain for a least significant digit change in the reading as displayed by the GT1174 or GT1192. Resolution varies over the frequency range of the gauge, and is related to the parameter being measured by the readout unit (period, frequency or linear value).

A.2. Extensómetros de resistência eléctrica tipo Carlson de pequena base



Carlson concrete instruments

Carlson Strain Meter



Standard Carlson Strain Meter

The Carlson Strain Meter is a device, which can be embedded in concrete to reveal the internal deformations. It responds to any change in dimension of the concrete, due to stress, creep, temperature change, moisture change or chemical growth. The main purpose of the strain meter, however, is to indirectly determine stress. Quick changes in stress are simply achieved by multiplying the measured strain by the modulus of elasticity. But for stress, which develops over a long period of time, account must be taken for changes in modulus of elasticity and of deformations due to creep and to all causes other than stress.

The standard strain meter may be embedded in concrete or attached to a surface with saddle mounts. The strain meter is furnished in three different lengths, from 8 cm to 51 cm (8 in. to 20 in.), but all with the identical sensing element. The end away from the cable has a tapped hole (1/4 - 28 UNF) to permit attachment to a spider for mass concrete embedment, or to incorporate an extender thereby increasing the length and sensitivity. The body is covered with PVC sleeving to break the bond with the concrete.

The miniature strain meter is for embedment in concrete applications where small size is essential. The miniature strain meter is furnished in three different lengths, from 10 cm to 20 cm (4 in. to 10 in.), but all with the identical sensing element. The end away from the cable has a tapped hole (6 - 32 UNF), which allows an extender to be added, thereby increasing the length and sensitivity. The body is covered with PVC sleeving to break the bond with the concrete.

The standard strain meters are intended for use in service structures, and the miniature strain meters are mainly for laboratory testing.



Official RST distributor in Europe & MENA

Geotechnical Centre
Rougham Industrial Estate
Rougham, Bury St Edmunds
Suffolk IP30 9ND
ENGLAND
Telephone: +44(0)1359 271167
Facsimile: +44(0)1359 271168
Geosense is a division of
Marton Geotechnical Services Ltd

info@mgsgeosense.co.uk

www.mgsgeosense.co.uk

ISO 9001:2000
REGISTERED QUALITY SYSTEM

applications

Measures internal deformations in concrete.

features

Responds to stress, creep, temperature, moisture change or chemical growth.

Indirectly determines stress.

GEOTECHNICAL. MINING. STRUCTURAL

C480003D



specifications + ordering info

Carlson Strain Meter



operating principle

Carlson Instruments are elastic wire strain meters containing two coils of highly elastic steel wire, one of which increases in length and electrical resistance when a strain occurs, while the other decreases. The ratio of the two resistances is independent of temperature (except for thermal expansion) and therefore the change in resistance ratio is a measure of strain. The total resistance is independent of strain since one coil increases the same amount as the other decreases due to a change in length of the meter. Therefore, the total resistance is a measure of temperature.

cable specs

The cable most commonly used is heavy duty, neoprene rubber-covered, with either three or four conductors. Alternate cable types are available to suit site specific conditions and we invite your inquiries.

The Carlson MA-6B and later series readout instruments, while compatible with both three and four wire systems, require only three conductors to monitor both temperature and resistance. Earlier versions of Carlson readouts require four conductors to monitor both parameters. We recommend that the total design length of cable be attached at the factory in order to assure system integrity. Should the final design length not be known at the time of order, specify the total length of cable to be supplied in bulk, and that a 1 m. (40 in.) length of either three or four conductor be attached. As conductor diameter is determined by lead length, please specify the approximate total length, to insure that the most appropriate cable is supplied.

While field splicing is possible, the instructions in the Carlson field manual must be followed.



Mini Carlson Strain Meter

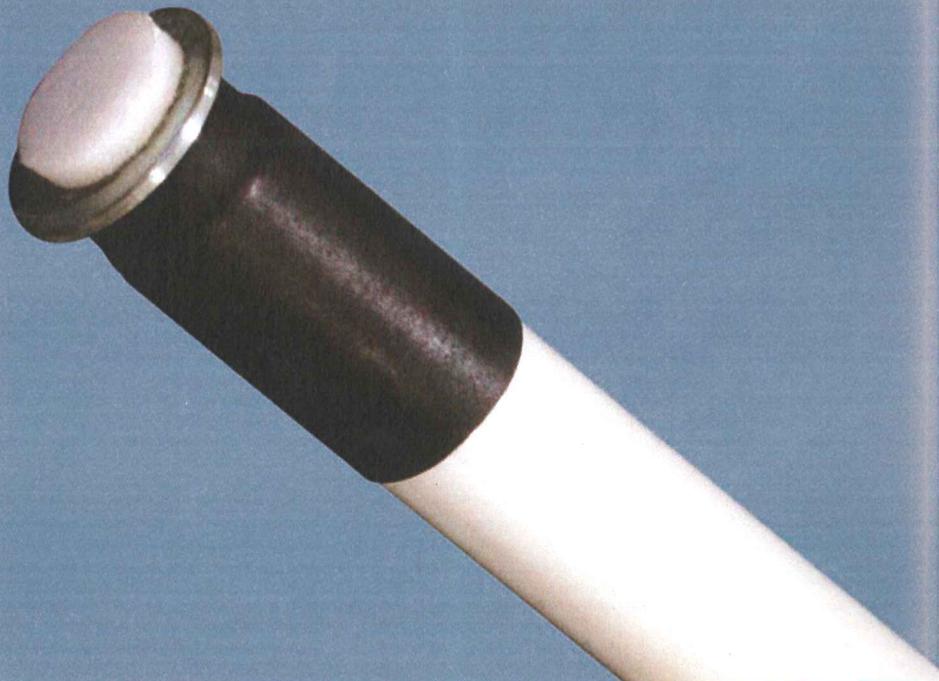
specifications

DESCRIPTION	STANDARD CONCRETE STRAIN METERS				MINI CONCRETE STRAIN METERS		
	A8	A10	A10S**	A20	M4	M8	M10
Range (micro-strain)*	2600	2100	2100	1050	3900	2000	1600
Resolution (micro-strain)	3.6	2.9	2.9	1.5	5.8	2.9	2.3
Resolution Temperature	0.1°F (.05°C)	0.1°F (.05°C)	0.1°F (.05°C)	0.1°F (.05°C)	0.1°F (.05°C)	0.1°F (.05°C)	0.1°F (.05°C)
Gauge Length	20.3 cm (8 in.)	25.4 cm (10 in.)	25.4 cm (10 in.)	50.8 cm (20 in.)	10.2 cm (4 in.)	20.4 cm (8 in.)	25.4 cm (10 in.)
Weight	.36 kg (.8 lbs.)	.59 kg (1.3 lbs.)	.59 kg (1.3 lbs.)	.82 kg (1.8 lbs.)	86 g (.19 lbs.)	145 g (.32 lbs.)	186 g (.37 lbs.)

*Normally set at factory for 2/3 to 3/4 or range in compression. Within limits, other settings may be specified.
**Saddle mount. Mounting diameter is 1-1/16 inches.

ordering info

DESCRIPTION	STANDARD CONCRETE STRAIN METERS				MINI CONCRETE STRAIN METERS		
	A8	A10	A10S**	A20	M4	M8	M10
Part Number	CA020A	CA021A	contact RST for more info	CA022A	CA070A	CA071A	CA072A



GEOTECHNICAL MINING STRUCTURAL

A.3. Extensómetros de fibra óptica tipo redes de Bragg

FiberSensing

bringing light to measurement

FS6200 – STRAIN SENSORS
HIGH PERFORMANCE FBG STRAIN SENSORS

STRAIN

- : high sensitivity
- : self-referenced
- : polyimide, stainless steel and composite housing
- : IP68 for embedded sensors
- : long-term reliability
- : large scale integration
- : intrinsically safe design
- : immunity to EMI/RFI
- : compatible with most FBG measurement units
- : automatic calibration for FiberSensing measurement units

FiberSensing strain gages are designed to be bonded, spot welded to structures and components (metallic, concrete, etc.) or directly cast into concrete wet mix. These sensors are fiber optic versions of the conventional resistance strain gages but completely passive, offering inherent insensitivity to environmental induced drift.

SENSOR

FiberSensing strain gages feature high accuracy and resolution, and immunity to electric sparks and EMI/RFI. They are compatible with most common FBG measurement units and suitable for remote sensing being possible to install them kilometers away from the measurement unit and connect a large number of sensors in a single optical fiber.

FS6200 strain sensors are optimized for different applications and are available in five formats:

- : Miniature Polyimide Strain Sensor
- : Composite Strain Sensor
- : Weldable Strain Sensor
- : Embedded Strain Sensor
- : Embedded Long Gage

The polyimide strain sensor is the equivalent to the electrical strain gage and can be installed using the same supplies and procedures.

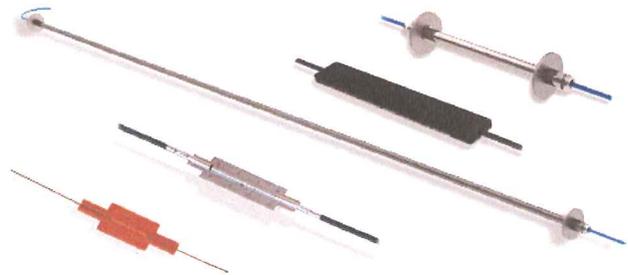
The weldable strain gage is designed to be spot welded onto metallic surfaces, offering a significant increase of productivity in the installation process.

The composite strain gage has a lightweight rugged sensor packaging due to the ability to embed the optical fiber FBG in CFRP material. This sensor is protected with a silicone rubber layer, being suited for surface application in both steel and concrete structures.

The embedded strain sensor is specially designed for embedding in concrete and is available with 3mm stainless steel coil buffer. It is protected against complete, continuous submersion in water guarantying IP68 protection. A long gage sensor with the same characteristics is also available.

INTEGRATION

Each FiberSensing sensor is provided with a complete calibration sheet, allowing its configuration to be easily and accurately set into FiberSensing Measurement Units.



APPLICATIONS

FiberSensing strain sensors can be used in a large range of monitoring applications, such as:

- : civil engineering structures
- : large concrete and metallic components
- : nuclear power plants and experiments

ACCESSORIES

The implementation of complex sensing networks in large structures is made simpler with FiberSensing accessories. These include metallicly protected jumpers especially designed to resist the harsh civil engineering environments, not only during the construction of the structures, but also during its lifetime (humidity, corrosion, etc.). FiberSensing polyimide and weldable strain sensors have an optional metallic protection for installation in severe environments.

ORDERING INFORMATION

FS6200 – Strain Sensor

p/n	WL	Type ¹
006 2XX XXX XXX	X	X

ST – Standard Strain
LG – Long Gage

A – 1528.9 nm
B – 1535.1 nm
C – 1541.5 nm
D – 1547.9 nm
E – 1554.3 nm
F – 1560.8 nm
G – 1567.2 nm
H – 1573.8 nm
I – 1580.2 nm
J – 1586.6 nm
K – 1516.1 nm
L – 1522.5 nm
W – xxxx.x nm (custom)

16 110 101 – miniature polyimide 40 mm – Ø 0.9 mm cable Laboratory
17 110 201 – composite 100 mm – Ø 3 mm cable Indoor
17 110 301 – composite 100 mm – Ø 3 mm cable Outdoor
20 110 201 – weldable 50 mm – Ø 3 mm cable Indoor
20 110 301 – weldable 50 mm – Ø 3 mm cable Outdoor
50 110 301 – embedded (IP68) – Ø 3 mm cable Embedded ST
50 110 301 – embedded (IP68) – Ø 3 mm cable Embedded LG

¹only for embedded sensors

22.Mar.2010

■ ■ ■ ■ ■ sensors



FiberSensing

bringing light to measurement

F56200 – STRAIN SENSORS
HIGH PERFORMANCE FBG STRAIN SENSORS

STRAIN

SPECIFICATIONS

Sensor

sensitivity	1.2 pm/ $\mu\epsilon$
measurement range ¹	4 000 $\mu\epsilon$
accuracy	$\pm 2 \mu\epsilon$
resolution ²	1 $\mu\epsilon$

Optical

central wavelength	1510 to 1590 nm
spectral width (FWHM)	< 0.2 nm
reflectivity	> 75%
insertion loss	< 0.1 dB
side lobe suppression	> 10 dB

Inputs / Outputs

	\varnothing 0.9 mm
cable type	\varnothing 3 mm Indoor \varnothing 3 mm Outdoor \varnothing 3 mm Embedded
cable length	1 m each side
connectors	FC/APC

¹ measurement range may be customized upon request

² for 1 pm resolution in wavelength measurement

Environmental

operation temperature	-20 to 80° C
relative humidity	< 90% at 80° C
cross sensitivity	10 pm/°C
protection class	embedded IP68

Mechanical

packaging	polyimide film stainless steel composite material
effective elasticity modulus ³	embedded 30 GPa
	polyimide 40 x 12 x 0.2 mm weldable 45 x 15 x 0.3 mm composite 130 x 20 x 4.5 mm embedded \varnothing 30 x 140 mm (ST) \varnothing 30 x 1040 mm (LG)
dimensions (max.) ⁴	
weight	polyimide 5 g weldable 5 g composite 40 g embedded 150 g (ST) 300 g (LG)

³ effective elasticity modulus and dimensions may be customized upon request

⁴ dimensions may be customized upon request

Specifications may change without notice

22.Mar.2010



ANEXO B

Boletins dos ensaios realizados para determinação do módulo de elasticidade



Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

Departamento de Materiais

Núcleo de Betões

Laboratório de Ensaios de Betões e Cimentos - LABTEC

Área de Ensaios Físicos - AEF

Boletim nº B304NB11

Pág. 1 de 5

Pedido nº 236NB11

Visto

A. Leitecourt Ribeiro
CHEFE DO NÚCLEO DE BETÕES

Data do boletim: 2011-03-28

Data do pedido: 2011-02-23

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.
Av. do Brasil, 101

Cliente:

LNEC–Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. 1700-066 LISBOA
DBB/NO

Obra: DBB/NO – Modelo 4 nº 250777 de 2010-04-06

BETÕES

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NP EN 12390-3 de 2009) MÓDULO DE ELASTICIDADE EM COMPRESSÃO (LNEC E 397 de 1993)

1 – INTRODUÇÃO

O Núcleo de Observação (NO) do Departamento de Barragens de Betão (DBB), solicitou ao Núcleo de Betões (NB) a colheita de amostras e o fabrico de prismas e cubos para a realização de ensaios para a determinação do módulo de elasticidade e resistências em provetes de betão utilizado em pontes e em barragens.

O betão utilizado no fabrico dos provetes designados “Betão Pontes” foi o do betão aplicado no novo viaduto ferroviário Variante de Alcácer do Sal, tendo sido fornecido pela Cimpor Betão e o betão utilizado no fabrico dos provetes designados “Betão Barragens”, foi o betão aplicado na barragem da Ferradosa (D200 betão de dosagem), tendo sido fabricado no LNEC.

2 – COMPOSIÇÕES DOS BETÕES UTILIZADOS NO FABRICO DOS PROVETES

2.1 – “Betão Pontes”

Designação do betão*	Ligante (kg)	Cimento (kg)	Cinzas Volantes (kg)	Areia fina (kg)	Areia Grossa (kg)	Brita 1 (kg)	Brita 2 (kg)	Água (kg)	Adjuvante1 (kg)	Adjuvante2 (kg)	Razão A/L
C40/50.S4XC4(P) D22.C10.2 (CPF)	450	400	50	220	520	540	500	165	1,80	5,40	0,37

* Betão fornecido pela Cimpor Betão.

2.2 – “Betão Barragens”

Designação do betão*	Cimento (kg)	Cinzas Volantes (kg)	Areia fina (kg)	Areia Grossa (kg)	Brita 1 (kg)	Brita 2 (kg)	Brita 3 (kg)	Água (Lts)	Razão A/L	Adjuvante	
										(Lts)	Tipo
D200	140	60	294	513	467	271	621	90	0,45	0,7	Sikament 195 R

* Betão fabricado no LNEC.

LNEC, I.P./DM
Av. do Brasil, 101 1700-066 LISBOA • Portugal
Tel. +351.21.844 32 21 Fax +351.21.844 30 23
Pess. Colectiva 501 389 660



L0127
Ensaios

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

Departamento de Materiais

Núcleo de Betões

Laboratório de Ensaios de Betões e Cimentos - LABTEC

Área de Ensaios Físicos - AEF

Boletim nº B304NB11

Pág. 2 de 5

Pedido nº 236NB11

Visto

A. Bettencourt Ribeiro
CHEFE DO NÚCLEO DE BETÕES

Os agregados empregados no fabrico deste betão tem a seguinte proveniência:

- Britas do descarregador da Barragem da Paradela;
- Areia fina de barreira de Sesimbra;
- Areia grossa natural de barreira Angola;
- Cimento da Cimpor Alhandra Tipo CEM II – A/L 42,5 R
- Cinzas Volantes de Sines;
- Adjuvante da Sika.

3 – ELEMENTOS RELATIVOS ÀS AMOSTRAS

Identificação da amostra*	Designação do betão*	Forma dos provetes	Dimensões (mm)	Data de fabrico	Obs.
Nºs 1 a 9	C40/50	Cúbicos	150X150X150	2010-06-23	"Betão Pontes"
FOBP 1 a 3	C40/50	Prismas	200X200X600	2010-06-23	"Betão Pontes"
REBP 1 a 3	C40/50	Prismas	200X200X600	2010-06-23	"Betão Pontes"
CVBP 1 a 3	C40/50	Prismas	200X200X600	2010-06-23	"Betão Pontes"
LVDT 1 e 2	C40/50	Prismas	200X200X600	2010-06-23	"Betão Pontes"
Nºs 1 a 9	D200	Cúbicos	150X150X150	2010-07-08	"Betão Barragens"
FOBB 1 a 3	D200	Prismas	200X200X600	2010-07-08	"Betão Barragens"
CABB 1 a 3	D200	Prismas	200X200X600	2010-07-08	"Betão Barragens"
CVBP 1 a 3	D200	Prismas	200X200X600	2010-07-08	"Betão Barragens"
LVDT 1 e 2	D200	Prismas	200X200X600	2010-07-08	"Betão Barragens"

* Dados da responsabilidade do cliente.

Boletim de Ensaios

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

Departamento de Materiais

Núcleo de Betões

Laboratório de Ensaios de Betões e Cimentos - LABTEC

Área de Ensaios Físicos - AEF

Boletim nº B304NB11

Pág. 3 de 5

Pedido nº 236NB11

Visto

A. Bettencourt Ribeiro
CHEFE DO NÚCLEO DE BETÕES

4 – PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Os provetes para ensaio de resistência à compressão foram conservados em câmara saturada até à data dos ensaios.

Os provetes para ensaio de módulo de elasticidade em compressão permaneceram ao ar da sala de laboratório com cerca de (20°C de temperatura e \pm 65% HR).

5 – RESULTADOS OBTIDOS

5.1. - Resistência à compressão

Identificação do provete*	Data		Idade (dias)	Secção (mm ²)	Massa (kg)	Massa volúmica (kg/m ³)**	Rotura		Obs.
	Fabrico*	Ensaio					Força (kN)	Tensão (MPa)	
1	2010-06-23	2010-06-30	7	22500	8,308	2460	1242	55,0	"Betão Pontes"
2	2010-06-23	2010-06-30	7	22500	8,219	2440	1302	58,0	"Betão Pontes"
3	2010-06-23	2010-06-30	7	22500	8,240	2440	1231	54,5	"Betão Pontes"
4	2010-06-23	2010-07-21	28	22500	8,236	2440	1413	63,0	"Betão Pontes"
5	2010-06-23	2010-07-21	28	22500	8,145	2410	1441	64,0	"Betão Pontes"
6	2010-06-23	2010-07-21	28	22500	8,198	2430	1401	62,5	"Betão Pontes"
7	2010-06-23	2010-09-21	90	22500	8,202	2430	1537	68,5	"Betão Pontes"
8	2010-06-23	2010-09-21	90	22500	8,262	2450	1492	66,5	"Betão Pontes"
9	2010-06-23	2010-09-21	90	22500	8,315	2460	1574	70,0	"Betão Pontes"
1	2010-07-08	2010-07-15	7	22500	8,308	2460	589	26,0	"Betão Barragens"
2	2010-07-08	2010-07-15	7	22500	8,184	2420	581	25,8	"Betão Barragens"
3	2010-07-08	2010-07-15	7	22500	8,088	2400	526	23,5	"Betão Barragens"
4	2010-07-08	2010-08-05	28	22500	8,399	2490	836	37,0	"Betão Barragens"
5	2010-07-08	2010-08-05	28	22500	8,310	2460	820	36,5	"Betão Barragens"
6	2010-07-08	2010-08-05	28	22500	8,229	2460	772	34,5	"Betão Barragens"
7	2010-07-08	2010-10-10	90	22500	8,421	2500	1066	47,4	"Betão Barragens"
8	2010-07-08	2010-10-10	90	22500	8,478	2510	1116	49,6	"Betão Barragens"
9	2010-07-08	2010-10-10	90	22500	8,416	2490	1143	50,8	"Betão Barragens"

* Dados da responsabilidade do cliente.

** A determinação do volume foi efectuada pela medição das dimensões do provete.

Boletim de Ensaios

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

Departamento de Materiais

Núcleo de Betões

Laboratório de Ensaios de Betões e Cimentos - LABTEC

Área de Ensaios Físicos - AEF

Boletim nº B304NB11

Pág. 4 de 5

Pedido nº 236NB11

Visto

A. Bettencourt Ribeiro
CHEFE DO NÚCLEO DE BETÕES

5.2 – Módulo de elasticidade em compressão

As deformações foram medidas através de um par de deflectómetros digitais.

Identificação do provete*	Data de Ensaio	Idade (dias)	Tensão de rotura do betão (MPa) **	Base de medida (mm)	Tensão máxima aplicada (MPa)	Número de ciclos	Módulo de Elasticidade (GPa)	Obs.
FOBP 1	2010-06-30	7	55,8	388	12,5	6	36,0	"Betão Pontes"
FOBP 2	2010-07-01	8	55,8	388	12,5	6	36,2	"Betão Pontes"
FOBP 3	2010-06-30	7	55,8	388	12,5	6	36,5	"Betão Pontes"
CVBP 1	2010-06-30	7	55,8	388	12,5	6	33,9	"Betão Pontes"
CVBP 2	2010-06-30	7	55,8	388	12,5	6	37,5	"Betão Pontes"
CVBP 3	2010-06-30	7	55,8	388	12,5	6	35,6	"Betão Pontes"
REBP 1	2010-06-30	7	55,8	388	12,5	6	35,5	"Betão Pontes"
REBP 2	2010-06-30	7	55,8	388	12,5	6	36,4	"Betão Pontes"
REBP 3	2010-06-30	7	55,8	388	12,5	6	37,6	"Betão Pontes"
FOBP 1	2010-07-21	28	63,1	388	17,8	6	38,4	"Betão Pontes"
FOBP 2	2010-07-21	28	63,1	388	17,8	6	37,5	"Betão Pontes"
FOBP 3	2010-07-21	28	63,1	388	17,8	6	38,2	"Betão Pontes"
CVBP 1	2010-07-21	28	63,1	388	17,8	6	35,7	"Betão Pontes"
CVBP 2	2010-07-21	28	63,1	388	17,8	6	39,2	"Betão Pontes"
CVBP 3	2010-07-21	28	63,1	388	17,8	6	35,1	"Betão Pontes"
REBP 1	2010-07-21	28	63,1	388	17,8	6	36,4	"Betão Pontes"
REBP 2	2010-07-21	28	63,1	388	17,8	6	37,7	"Betão Pontes"
REBP 3	2010-07-21	28	63,1	388	17,8	6	32,9	"Betão Pontes"
FOBP 1	2010-09-21	90	68,3	388	19,3	6	40,0	"Betão Pontes"
FOBP 2	2010-09-21	90	68,3	388	19,3	6	39,6	"Betão Pontes"
FOBP 3	2010-09-21	90	68,3	388	19,3	6	38,8	"Betão Pontes"
CVBP 1	2010-09-21	90	68,3	388	19,3	6	37,0	"Betão Pontes"
CVBP 2	2010-09-21	90	68,3	388	19,3	6	39,1	"Betão Pontes"
CVBP 3	2010-09-21	90	68,3	388	19,3	6	35,5	"Betão Pontes"
REBP 1	2010-09-21	90	68,3	388	19,3	6	37,0	"Betão Pontes"
REBP 2	2010-09-21	90	68,3	388	19,3	6	38,0	"Betão Pontes"
REBP 3	2010-09-21	90	68,3	388	19,3	6	34,7	"Betão Pontes"
FOBP 1	2010-12-20	180	68,3	388	19,3	6	40,0	"Betão Pontes"
FOBP 2	2010-12-20	180	68,3	388	19,3	6	39,5	"Betão Pontes"
FOBP 3	2010-12-20	180	68,3	388	19,3	6	38,6	"Betão Pontes"
REBP 1	2010-12-20	180	68,3	388	19,3	6	37,3	"Betão Pontes"
REBP 2	2010-12-20	180	68,3	388	19,3	6	37,5	"Betão Pontes"
REBP 3	2010-12-20	180	68,3	388	19,3	6	35,2	"Betão Pontes"
CVBP 1	2010-12-20	180	68,3	388	19,3	6	36,7	"Betão Pontes"
CVBP 2	2010-12-20	180	68,3	388	19,3	6	39,5	"Betão Pontes"
CVBP 3	2010-12-20	180	68,3	388	19,3	6	35,2	"Betão Pontes"
FOBP 1	2011-01-06	197	68,3	388	19,3	6	40,0	"Betão Pontes"
FOBP 2	2011-01-06	197	68,3	388	19,3	6	39,7	"Betão Pontes"
FOBP 3	2011-01-06	197	68,3	388	19,3	6	37,5	"Betão Pontes"

* Dados da responsabilidade do cliente.

** Valor média da tensão de rotura média de três provetes cúbicos.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

Departamento de Materiais

Núcleo de Betões

Laboratório de Ensaios de Betões e Cimentos - LABTEC

Área de Ensaios Físicos - AEF

Boletim nº B304NB11

Pág. 5 de 5

Pedido nº 236NB11

Visto

A. Bettencourt Ribeiro
CHEFE DO NÚCLEO DE BETÕES

Identificação do provete*	Data de Ensaio	Idade (dias)	Tensão de rotura do betão (MPa) **	Base de medida (mm)	Tensão máxima aplicada (MPa)	Número de ciclos	Módulo de Elasticidade (GPa)	Obs.
FOBB 1	2010-07-15	7	25,1	388	7,4	6	26,3	"Betão Barragens"
FOBB 2	2010-07-15	7	25,1	388	7,4	6	26,2	"Betão Barragens"
FOBB 3	2010-07-15	7	25,1	388	7,4	6	25,0	"Betão Barragens"
LVDT 1	2010-07-15	7	25,1	388	7,4	6	27,2	"Betão Barragens"
CABB 1	2010-07-15	7	25,1	388	7,4	6	20,8	"Betão Barragens"
CABB 2	2010-07-15	7	25,1	388	7,4	6	20,9	"Betão Barragens"
CABB 3	2010-07-15	7	25,1	388	7,4	6	22,4	"Betão Barragens"
FOBB 1	2010-08-05	28	36,0	388	10,2	6	30,9	"Betão Barragens"
FOBB 2	2010-08-05	28	36,0	388	10,2	6	30,4	"Betão Barragens"
FOBB 3	2010-08-05	28	36,0	388	10,2	6	29,9	"Betão Barragens"
CABB 1	2010-08-05	28	36,0	388	10,2	6	25,8	"Betão Barragens"
CABB 2	2010-08-05	28	36,0	388	10,2	6	25,7	"Betão Barragens"
CABB 3	2010-08-05	28	36,0	388	10,2	6	27,0	"Betão Barragens"
LVDT 1	2010-08-05	28	36,0	388	10,2	6	30,3	"Betão Barragens"
FOBB 1	2010-10-07	91	49,2	388	10,2	6	33,7	"Betão Barragens"
FOBB 2	2010-10-07	91	49,2	388	10,2	6	32,7	"Betão Barragens"
FOBB 3	2010-10-07	91	49,2	388	10,2	6	32,0	"Betão Barragens"
CABB 1	2010-10-07	91	49,2	388	10,2	6	29,0	"Betão Barragens"
CABB 2	2010-10-07	91	49,2	388	10,2	6	28,2	"Betão Barragens"
CABB 3	2010-10-07	91	49,2	388	10,2	6	29,7	"Betão Barragens"
LVDT 2	2010-10-07	91	49,2	388	10,2	6	32,0	"Betão Barragens"
FOBB 1	2011-01-06	180	49,2	388	10,2	6	34,8	"Betão Barragens"
FOBB 2	2011-01-06	180	49,2	388	10,2	6	34,5	"Betão Barragens"
FOBB 3	2011-01-06	180	49,2	388	10,2	6	33,4	"Betão Barragens"
CABB 1	2011-01-06	180	49,2	388	10,2	6	30,0	"Betão Barragens"
CABB 2	2011-01-06	180	49,2	388	10,2	6	29,4	"Betão Barragens"
CABB 3	2011-01-06	180	49,2	388	10,2	6	30,8	"Betão Barragens"
LVDT 2	2011-01-06	180	49,2	388	10,2	6	33,4	"Betão Barragens"

* Dados da responsabilidade do cliente.

** Tensão de rotura média de três provetes cúbicos.

O Chefe da Área de Ensaios Físicos

Sofia Ribeiro
Eng^a. Sofia Ribeiro

ANEXO C

Resultados dos ensaios realizados para determinação do módulo de elasticidade

C.1. Betão de pontes

C.1.1. Ensaio ao 7º dia

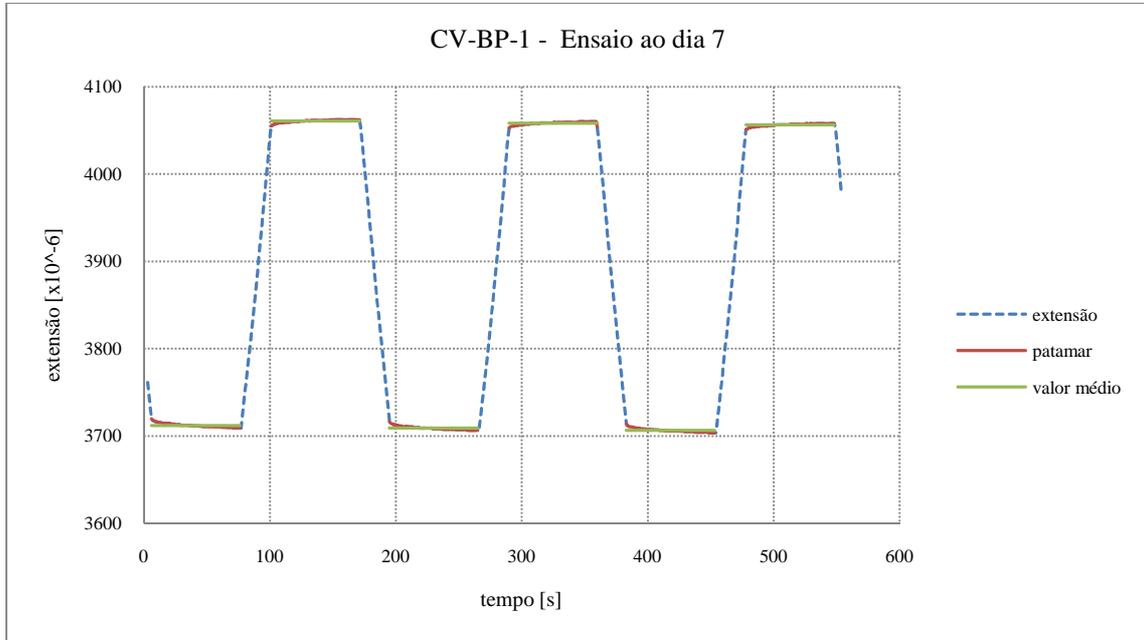


Figura C.1: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CV-BP-1 aos 7 dias

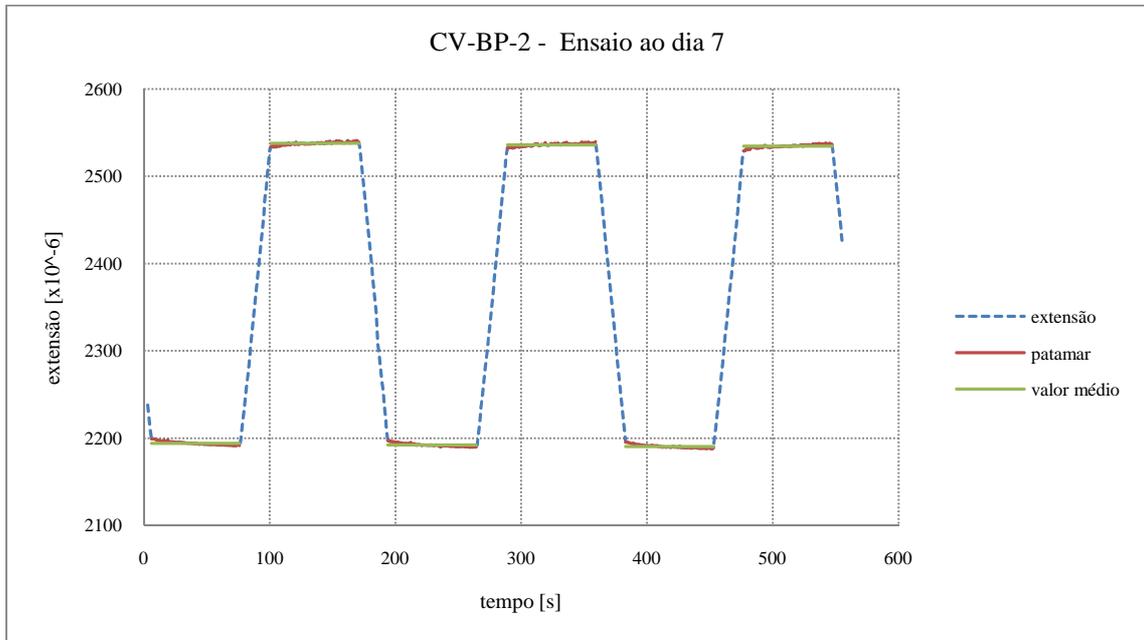


Figura C.2: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CV-BP-2 aos 7 dias

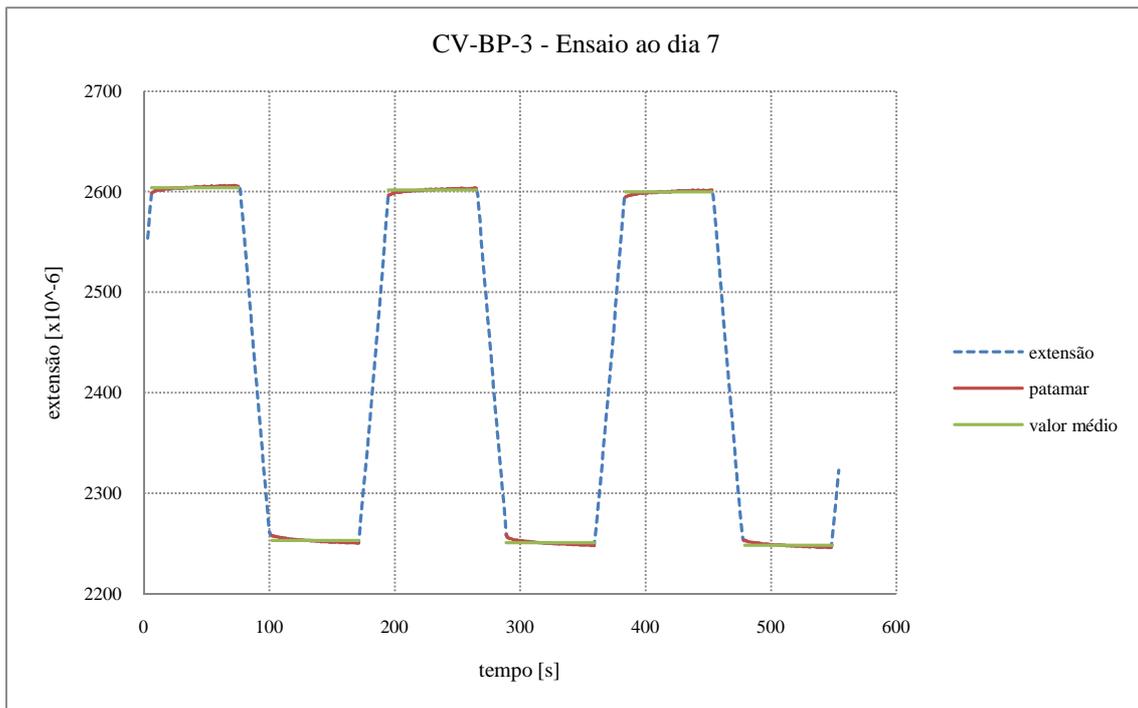


Figura C.3: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CV-BP-3 aos 7 dias

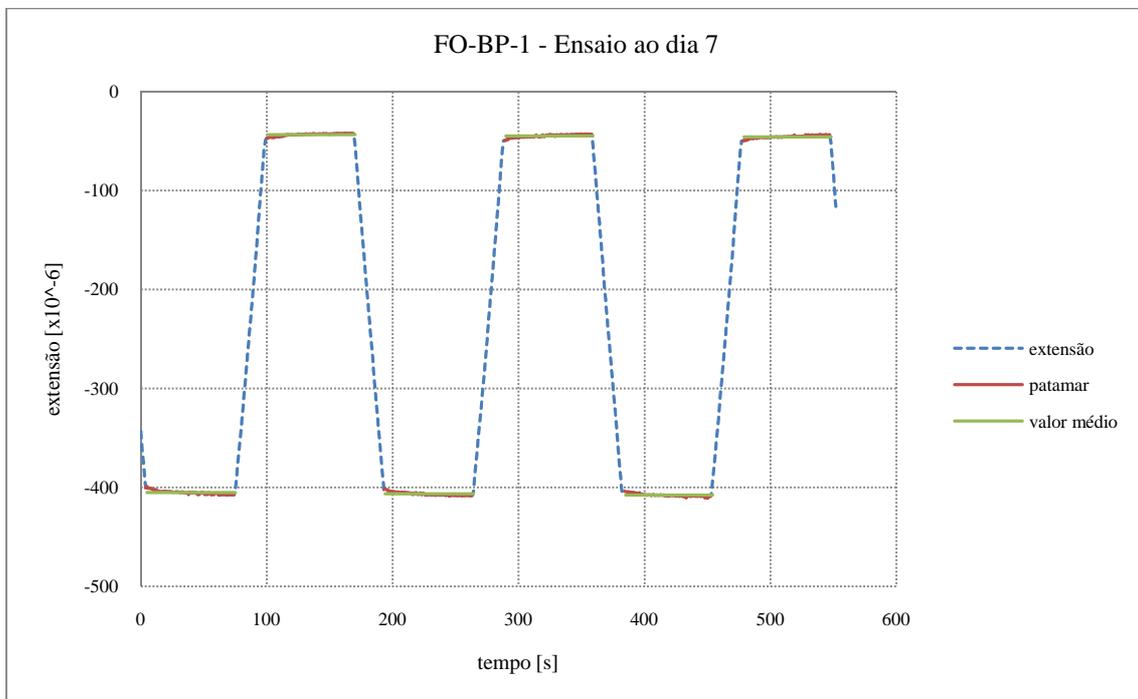


Figura C.4: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BP-1 aos 7 dias

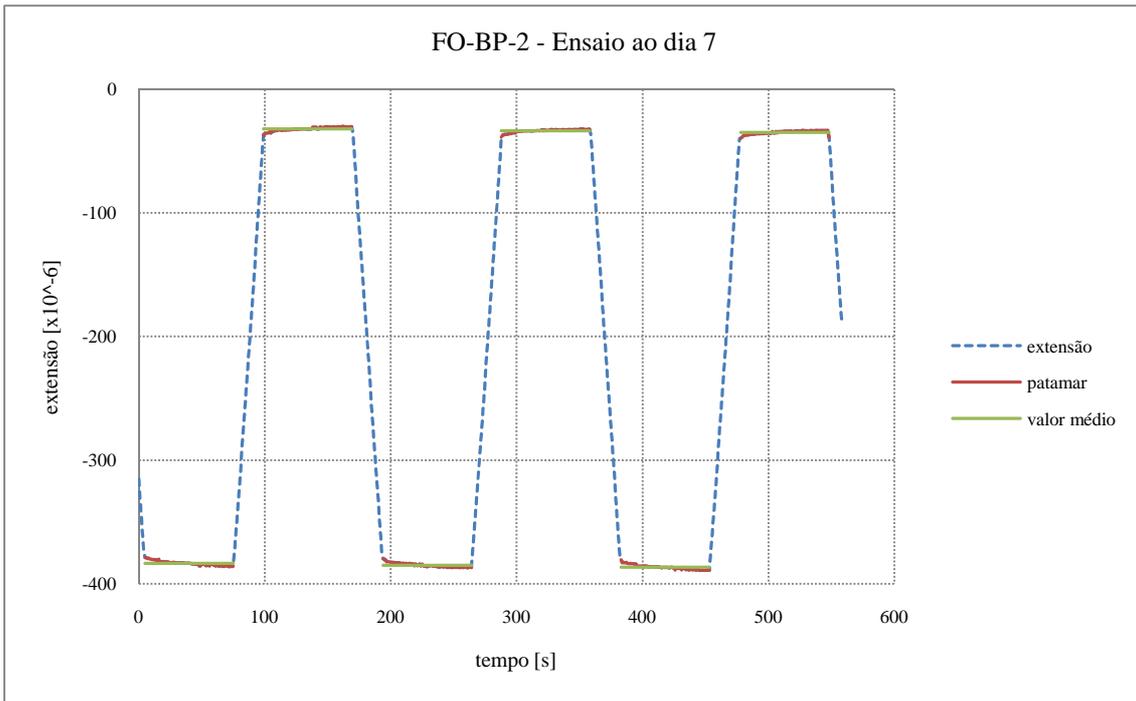


Figura C.5: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BP-2 aos 7 dias

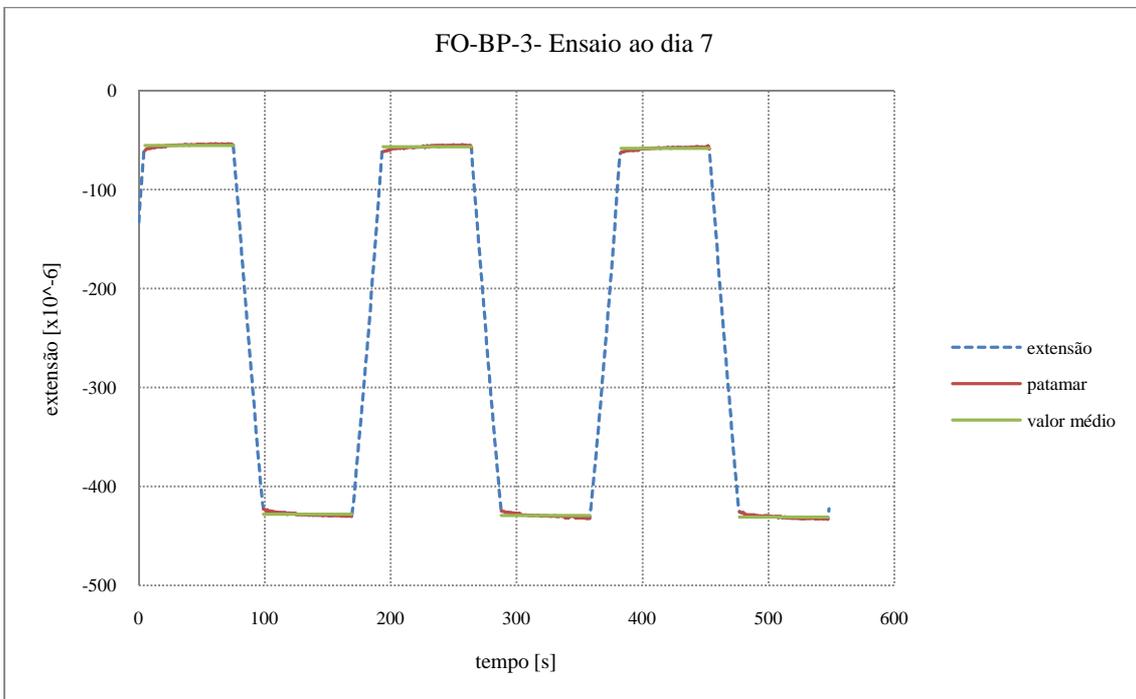


Figura C.6: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BP-3 aos 7 dias

Tabela C.1: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de corda vibrante aos 7 dias, betão de pontes

CV-BP-1				CV-BP-2				CV-BP-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	12,5	ϵ_{\max_1}	3712,06	σ_{\max_1}	12,5	ϵ_{\max_1}	2194,15	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	2603,98
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	4060,62	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	2537,49	σ_{\max_1}	12,5	ϵ_{\max_1}	2252,85
σ_{\max_2}	12,5	ϵ_{\max_2}	3708,91	σ_{\max_2}	12,5	ϵ_{\max_2}	2192,15	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	2601,53
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	4058,17	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	2535,98	σ_{\max_2}	12,5	ϵ_{\max_2}	2250,59
σ_{\max_3}	12,5	ϵ_{\max_3}	3706,34	σ_{\max_3}	12,5	ϵ_{\max_3}	2190,41	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	2599,62
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	4056,27	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	2534,34	σ_{\max_3}	12,5	ϵ_{\max_3}	2248,29

Tabela C.2: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de resistência eléctrica aos 7 dias, betão de pontes

FO-BP-1				FO-BP-2				FO-BP-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	12,5	ϵ_{\max_1}	-405,10	σ_{\max_1}	12,5	ϵ_{\max_1}	-383,38	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-55,18
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-43,45	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-32,16	σ_{\max_1}	12,5	ϵ_{\max_1}	-428,01
σ_{\max_2}	12,5	ϵ_{\max_2}	-406,54	σ_{\max_2}	12,5	ϵ_{\max_2}	-384,94	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-56,77
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-44,66	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-33,68	σ_{\max_2}	12,5	ϵ_{\max_2}	-429,39
σ_{\max_3}	12,5	ϵ_{\max_3}	-407,76	σ_{\max_3}	12,5	ϵ_{\max_3}	-386,58	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-58,25
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-45,58	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-34,90	σ_{\max_3}	12,5	ϵ_{\max_3}	-430,83

C.1.2. Ensaio ao 28º dia

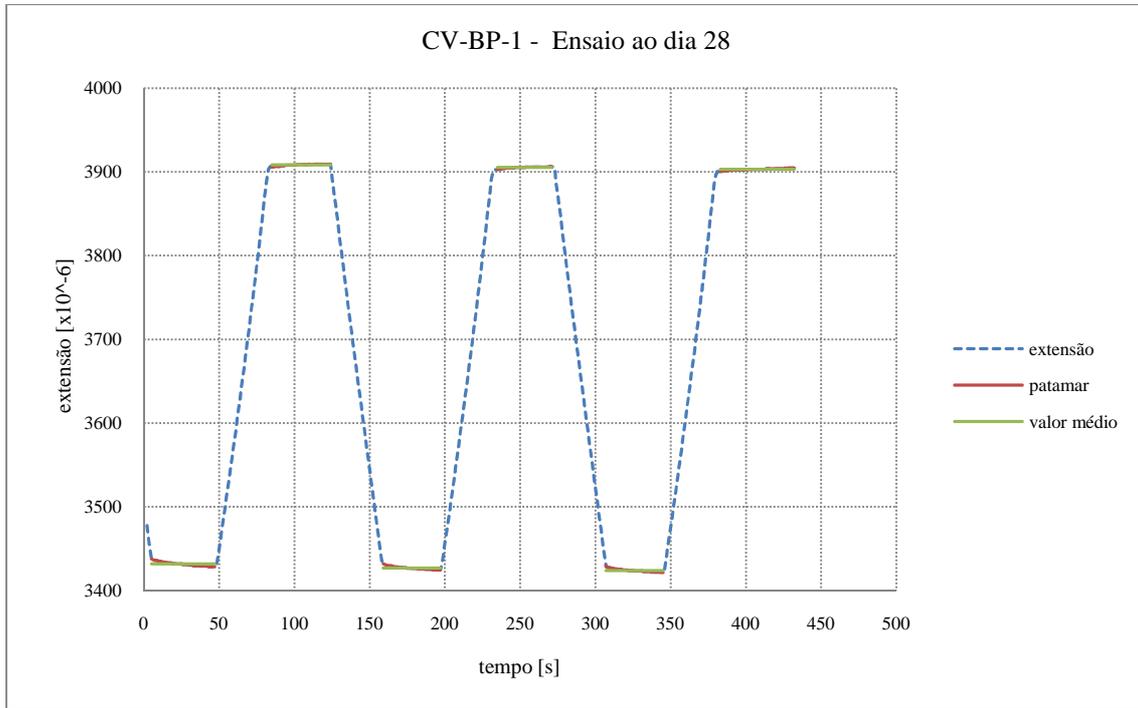


Figura C.7: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CV-BP-1 aos 28 dias

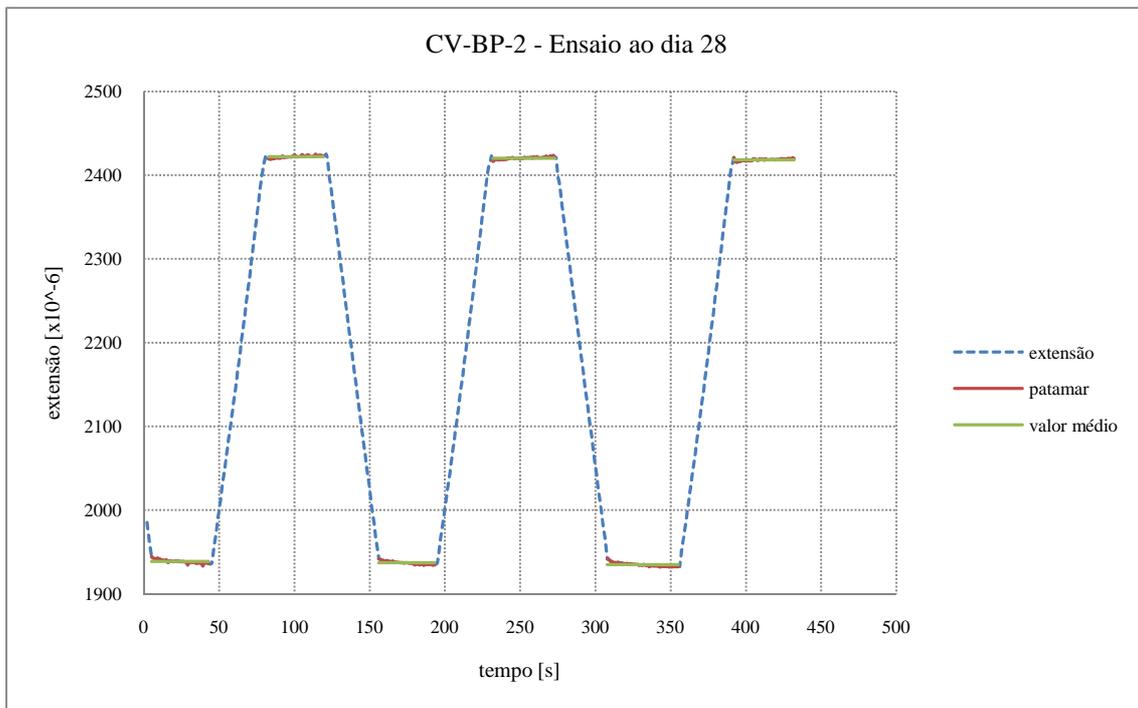


Figura C.8: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CV-BP-2 aos 28 dias

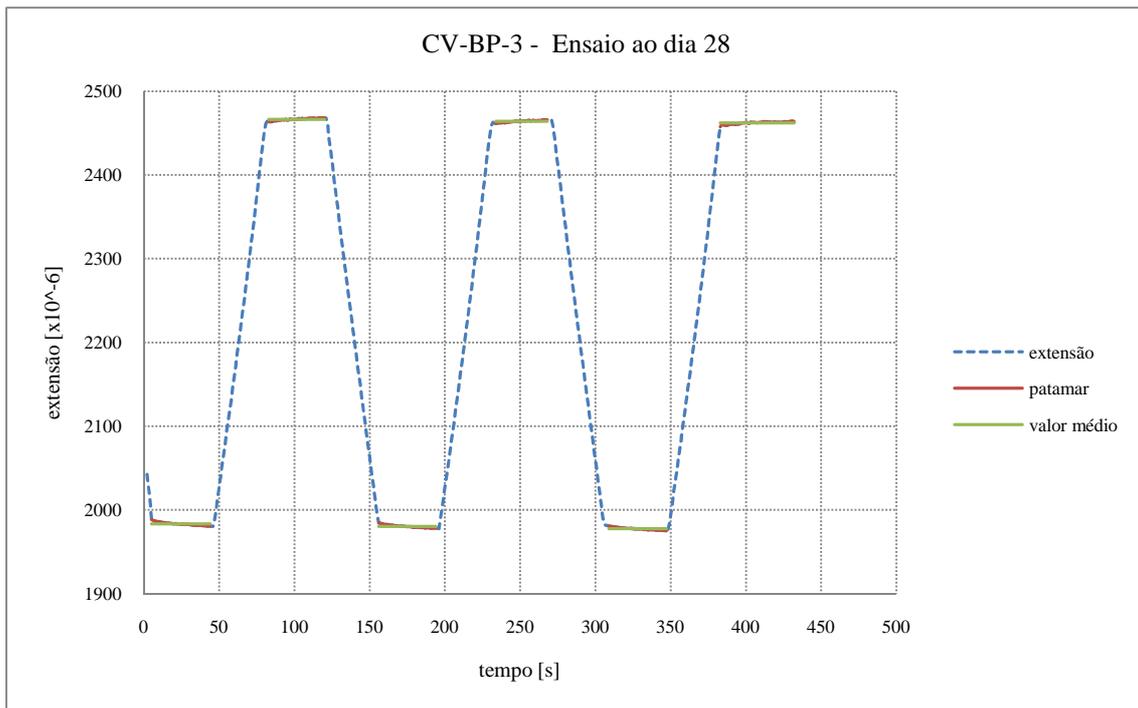


Figura C.9: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CV-BP-3 aos 28 dias

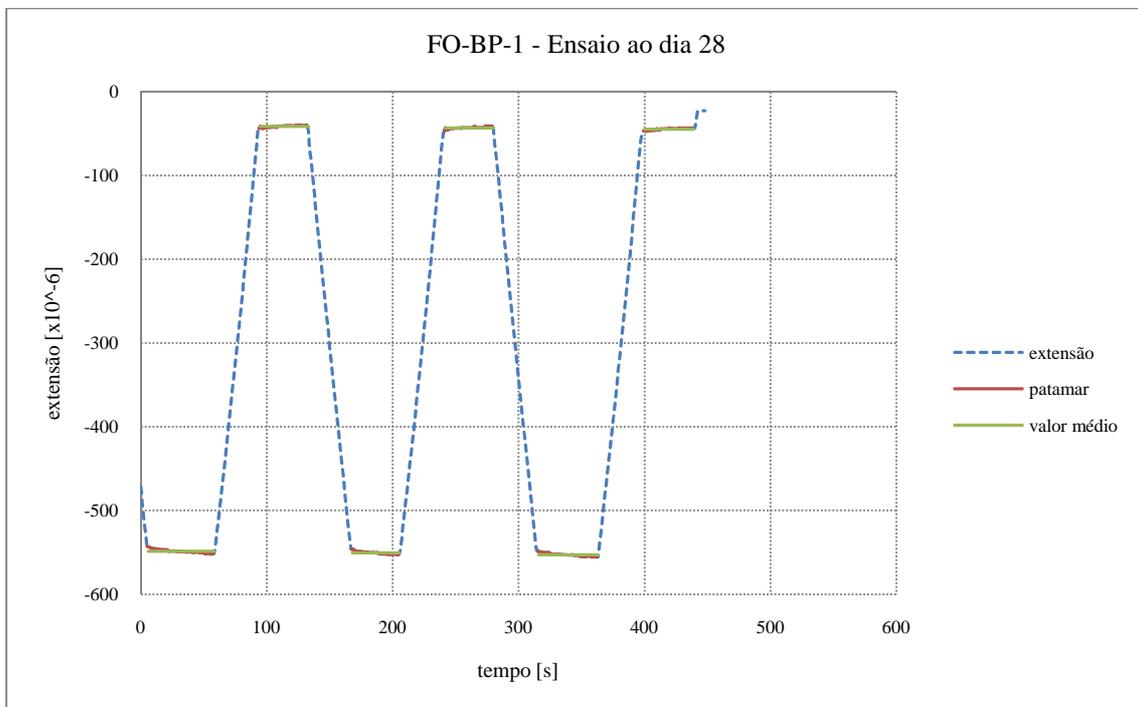


Figura C.10: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BP-1 aos 28 dias

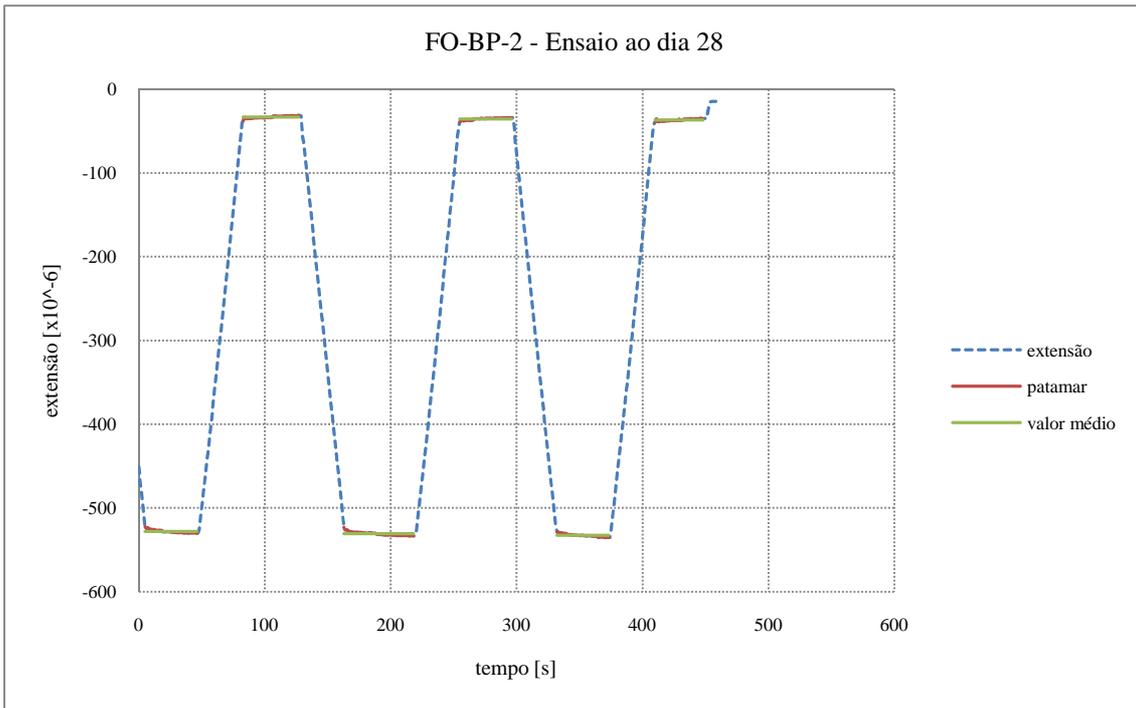


Figura C.11: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BP-2 aos 28 dias

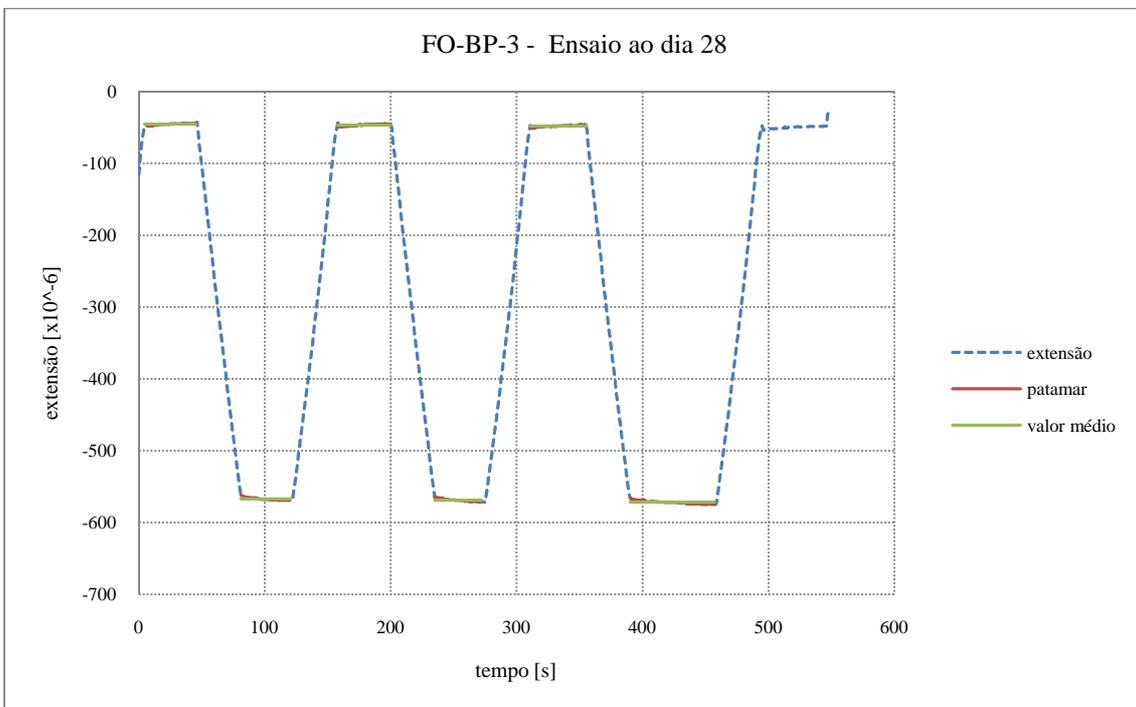


Figura C.12: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BP-3 aos 28 dias

Tabela C.3: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de corda vibrante aos 28 dias, betão de pontes

CV-BP-1				CV-BP-2				CV-BP-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	17,8	ϵ_{\max_1}	3431,68	σ_{\max_1}	17,8	ϵ_{\max_1}	1938,69	σ_{\max_1}	17,8	ϵ_{\max_1}	1983,32
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	3908,20	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	2421,94	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	2466,36
σ_{\max_2}	17,8	ϵ_{\max_2}	3426,93	σ_{\max_2}	17,8	ϵ_{\max_2}	1937,01	σ_{\max_2}	17,8	ϵ_{\max_2}	1980,36
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	3905,09	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	2420,25	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	2463,92
σ_{\max_3}	17,8	ϵ_{\max_3}	3424,00	σ_{\max_3}	17,8	ϵ_{\max_3}	1934,76	σ_{\max_3}	17,8	ϵ_{\max_3}	1977,42
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	3902,93	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	2418,40	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	2462,14

Tabela C.4: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de resistência eléctrica aos 28 dias, betão de pontes

FO-BP-1				FO-BP-2				FO-BP-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	17,8	ϵ_{\max_1}	-548,53	σ_{\max_1}	17,8	ϵ_{\max_1}	-528,17	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-45,25
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-41,35	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-33,35	σ_{\max_1}	17,8	ϵ_{\max_1}	-567,22
σ_{\max_2}	17,8	ϵ_{\max_2}	-550,46	σ_{\max_2}	17,8	ϵ_{\max_2}	-530,93	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-46,34
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-43,07	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-35,50	σ_{\max_2}	17,8	ϵ_{\max_2}	-568,91
σ_{\max_3}	17,8	ϵ_{\max_3}	-552,81	σ_{\max_3}	17,8	ϵ_{\max_3}	-532,80	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\max_3}	-47,91
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-44,65	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-36,78	σ_{\max_3}	0,6	ϵ_{\max_3}	-571,49

C.1.3. Ensaio ao 90º dia

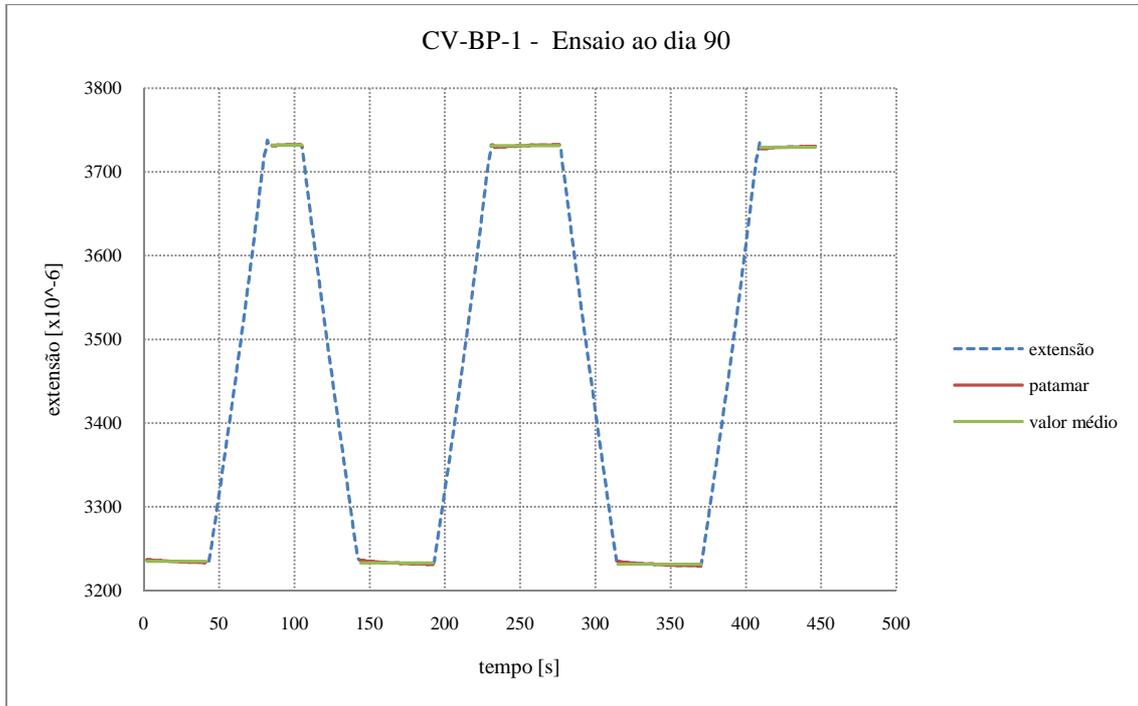


Figura C.14: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CV-BP-1 aos 90 dias

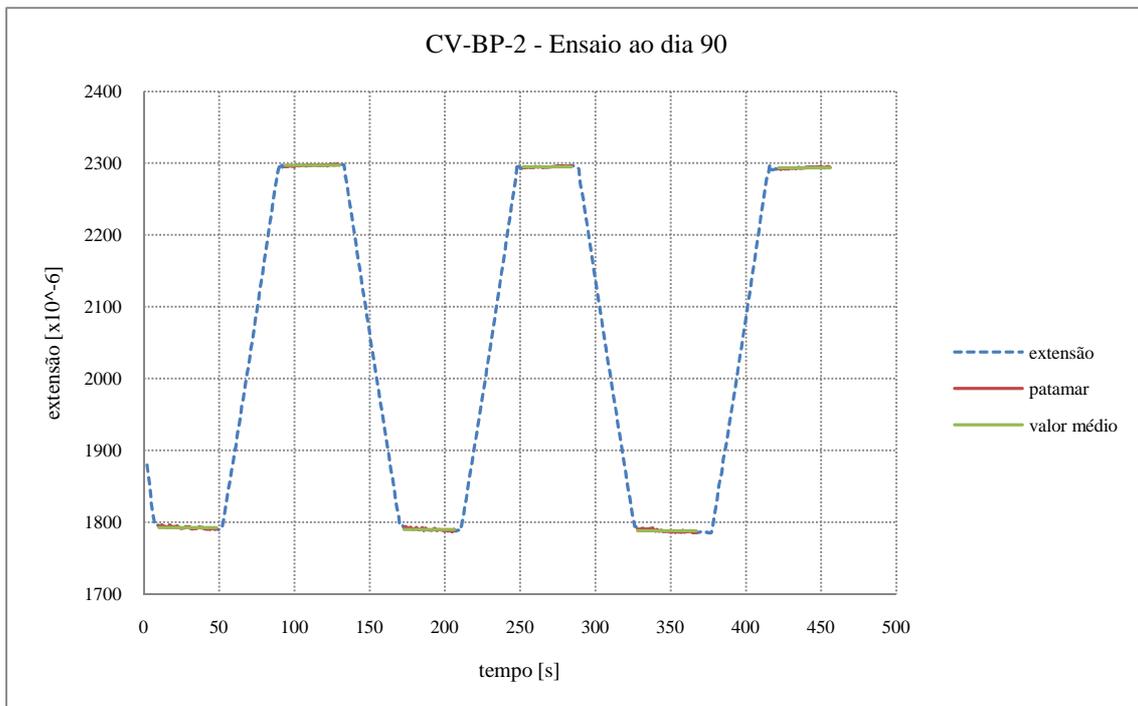


Figura C.15: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CV-BP-2 aos 90 dias

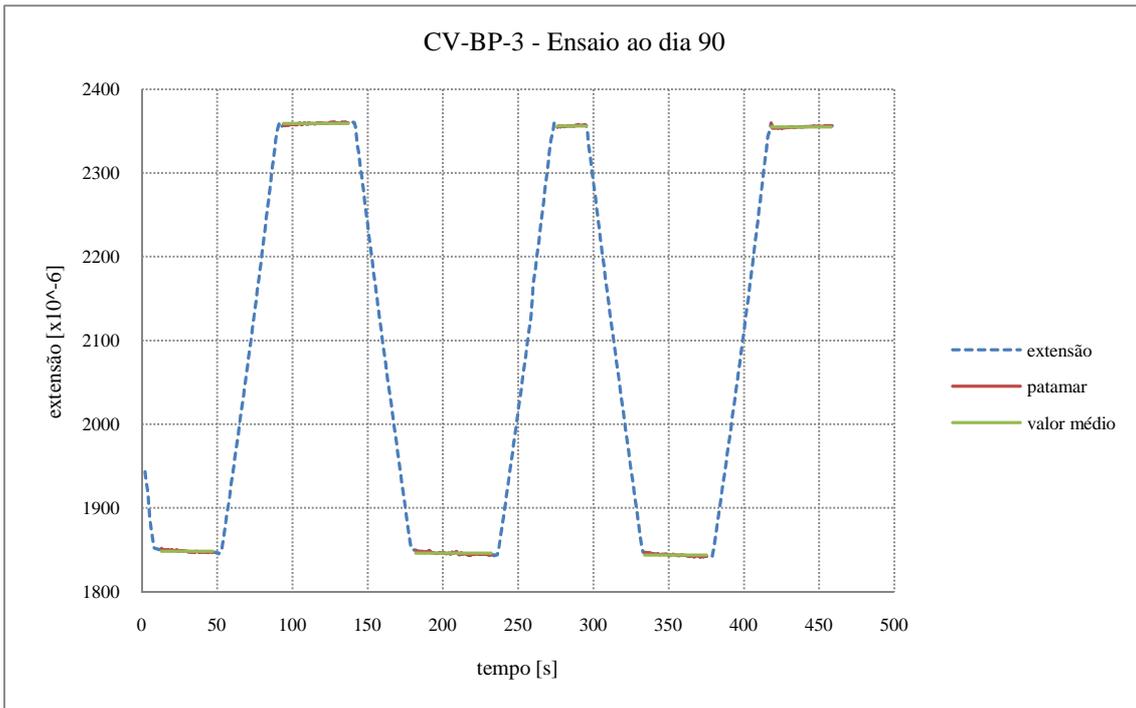


Figura C.16: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CV-BP-3 aos 90 dias

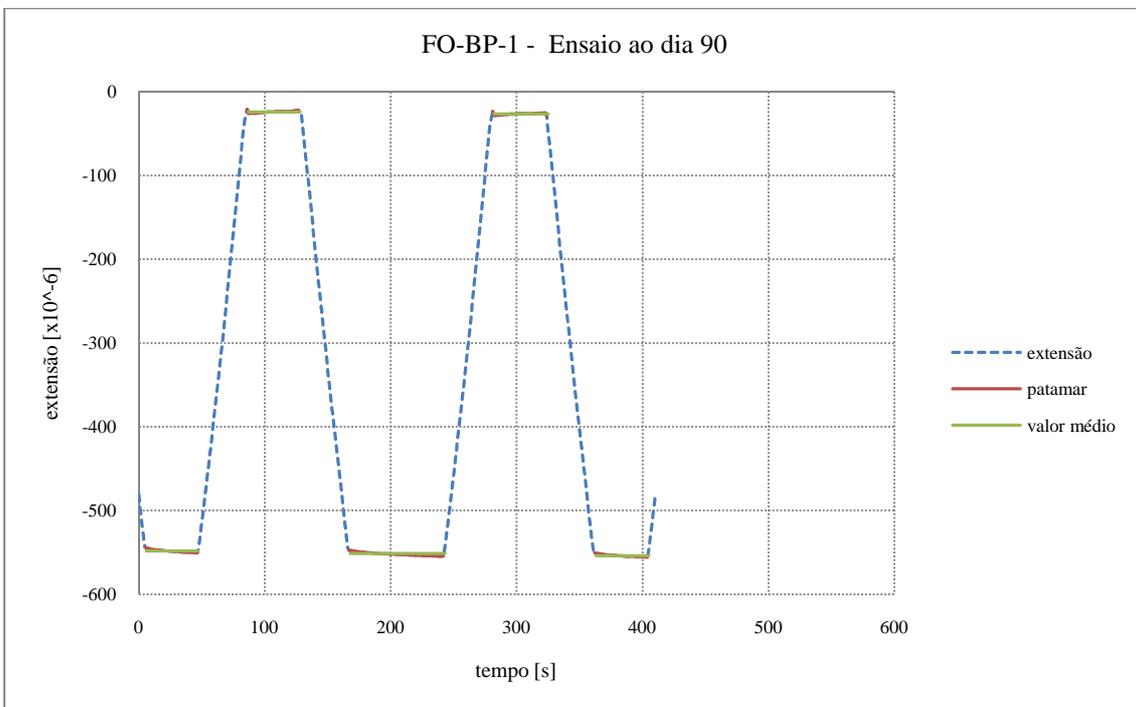


Figura C.17: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BP-1 aos 90 dias

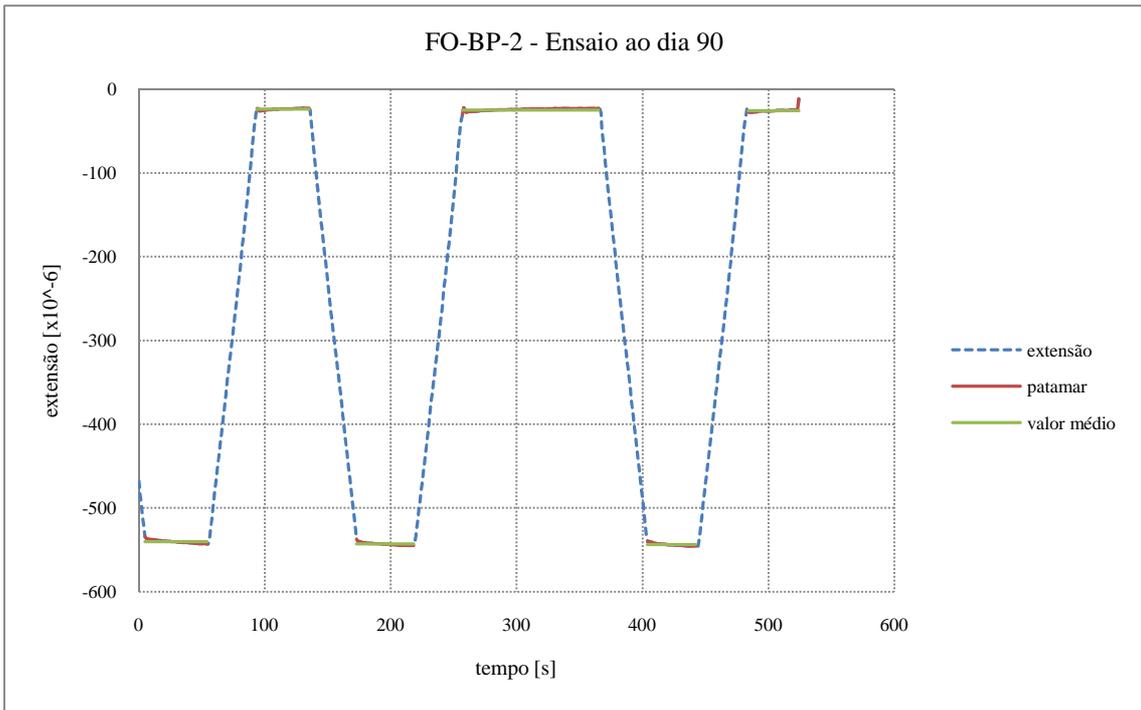


Figura C.18: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BP-2 aos 90 dias

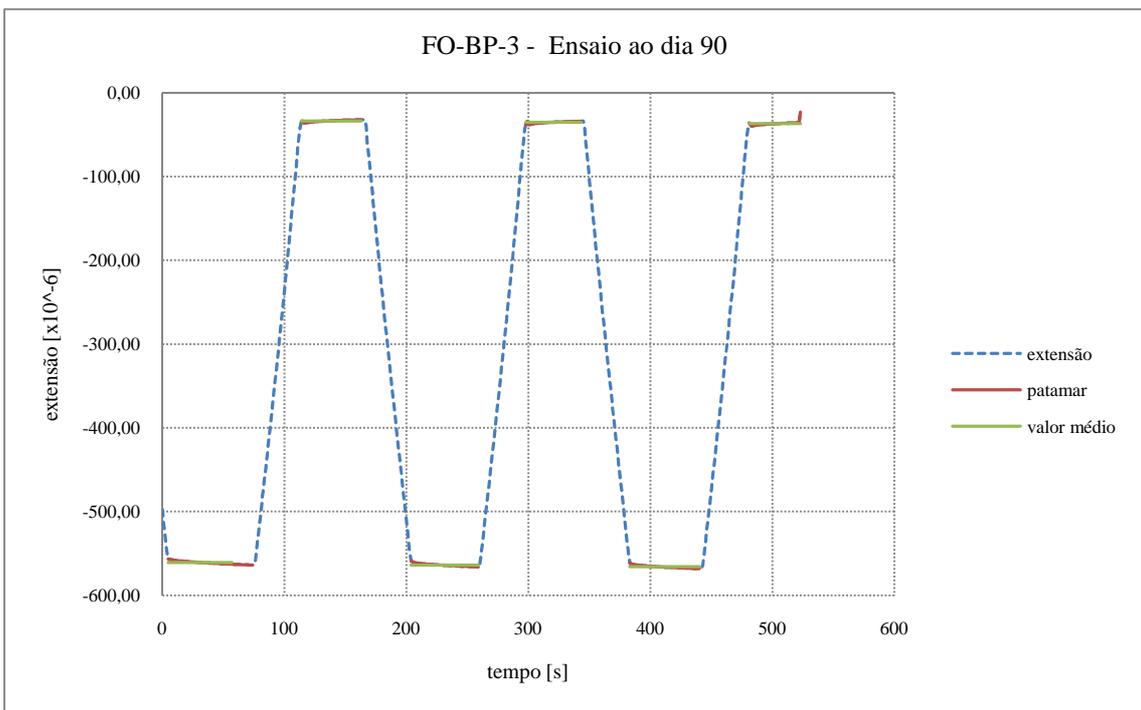


Figura C.19: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BP-3 aos 90 dias

Tabela C.5: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de corda vibrante aos 90 dias, betão de pontes

CV-BP-1				CV-BP-2				CV-BP-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	19,3	ϵ_{\max_1}	3234,90	σ_{\max_1}	19,3	ϵ_{\max_1}	1792,36	σ_{\max_1}	19,3	ϵ_{\max_1}	1848,31
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	3731,93	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	2296,86	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	2358,91
σ_{\max_2}	19,3	ϵ_{\max_2}	3232,98	σ_{\max_2}	19,3	ϵ_{\max_2}	1789,71	σ_{\max_2}	19,3	ϵ_{\max_2}	1845,84
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	3731,13	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	2294,98	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	2356,09
σ_{\max_3}	19,3	ϵ_{\max_3}	3231,32	σ_{\max_3}	19,3	ϵ_{\max_3}	1787,76	σ_{\max_3}	19,3	ϵ_{\max_3}	1843,74
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	3729,35	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	2293,49	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	2354,96

Tabela C.6: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de resistência eléctrica aos 90 dias, betão de pontes

FO-BP-1				FO-BP-2				FO-BP-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	19,3	ϵ_{\max_1}	-548,35	σ_{\max_1}	19,3	ϵ_{\max_1}	-540,36	σ_{\max_1}	19,3	ϵ_{\max_1}	-560,78
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-24,12	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-23,76	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-33,59
σ_{\max_2}	19,3	ϵ_{\max_2}	-551,40	σ_{\max_2}	19,3	ϵ_{\max_2}	-543,14	σ_{\max_2}	19,3	ϵ_{\max_2}	-563,94
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-26,54	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-25,09	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-35,38
σ_{\max_3}	19,3	ϵ_{\max_3}	-553,96	σ_{\max_3}	19,3	ϵ_{\max_3}	-543,84	σ_{\max_3}	19,3	ϵ_{\max_3}	-566,03
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	0,00	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-25,66	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-36,79

C.2. Betão de barragens

C.2.1. Ensaio ao 7º dia

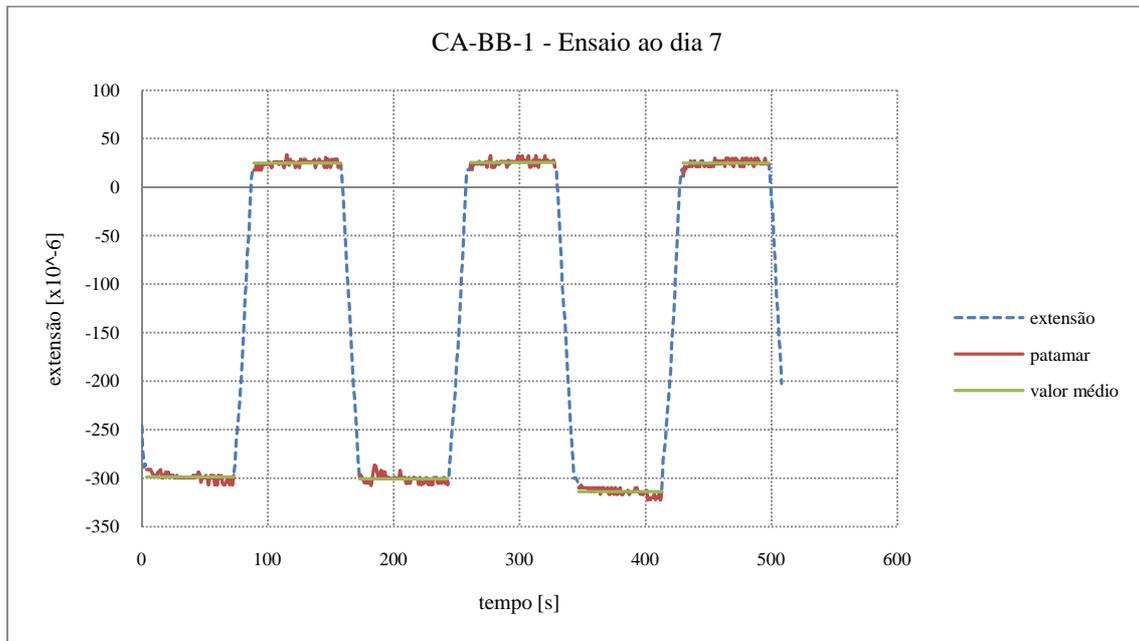


Figura C.20: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CA-BB-1 aos 7 dias

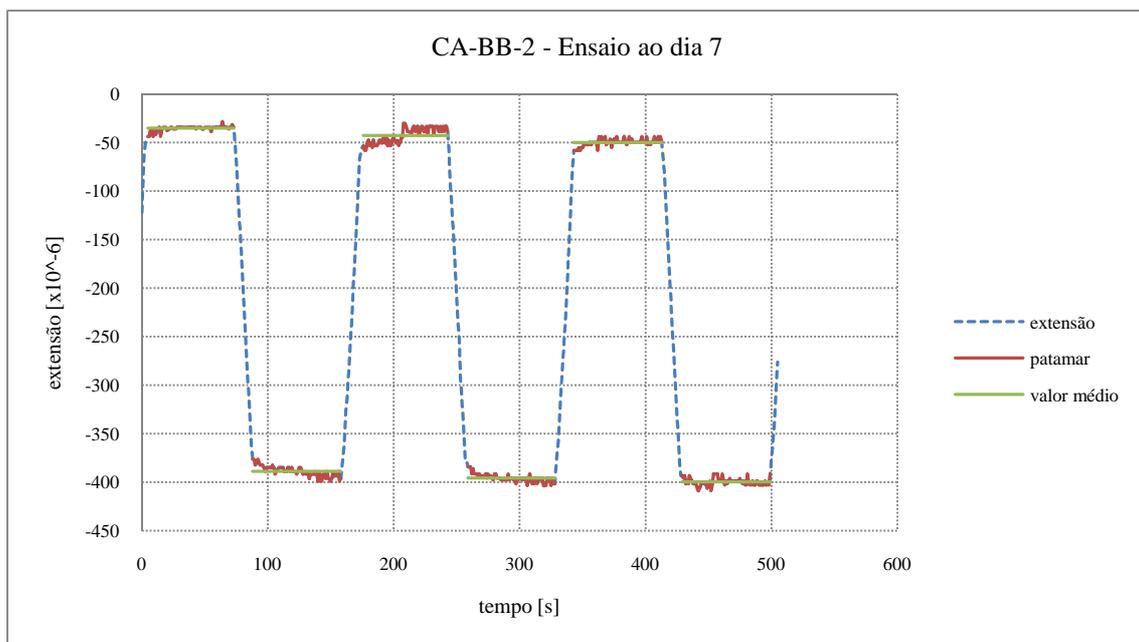


Figura C.21: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CA-BB-2 aos 7 dias

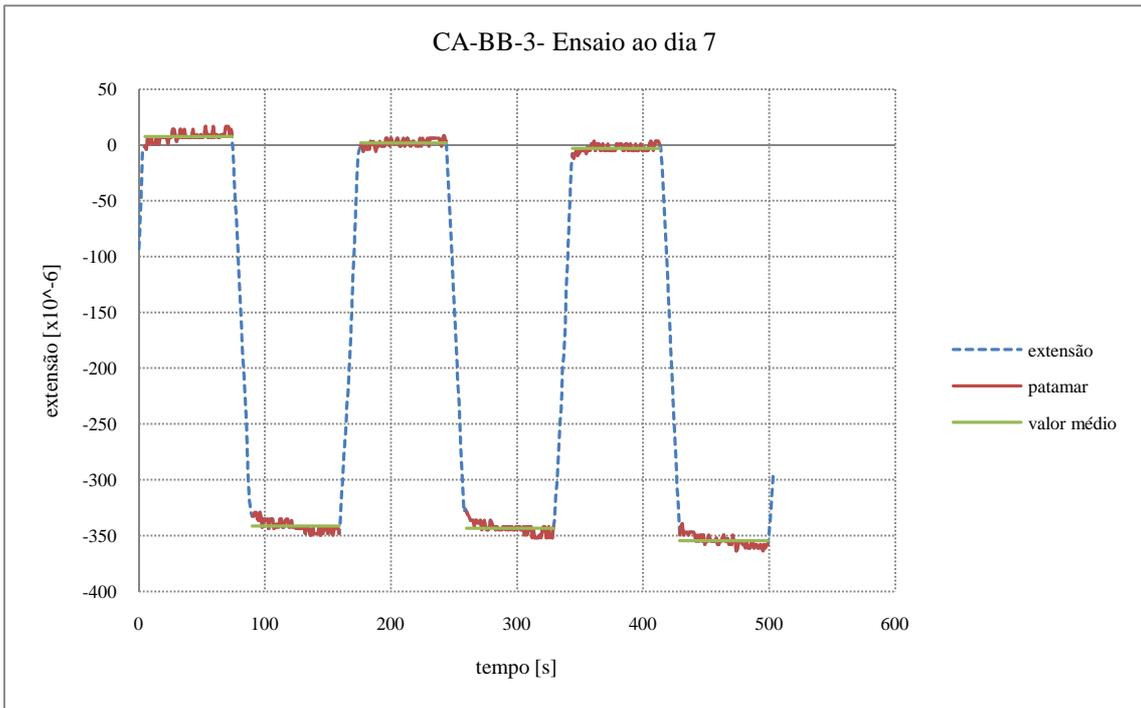


Figura C.22: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CA-BB-3 aos 7 dias

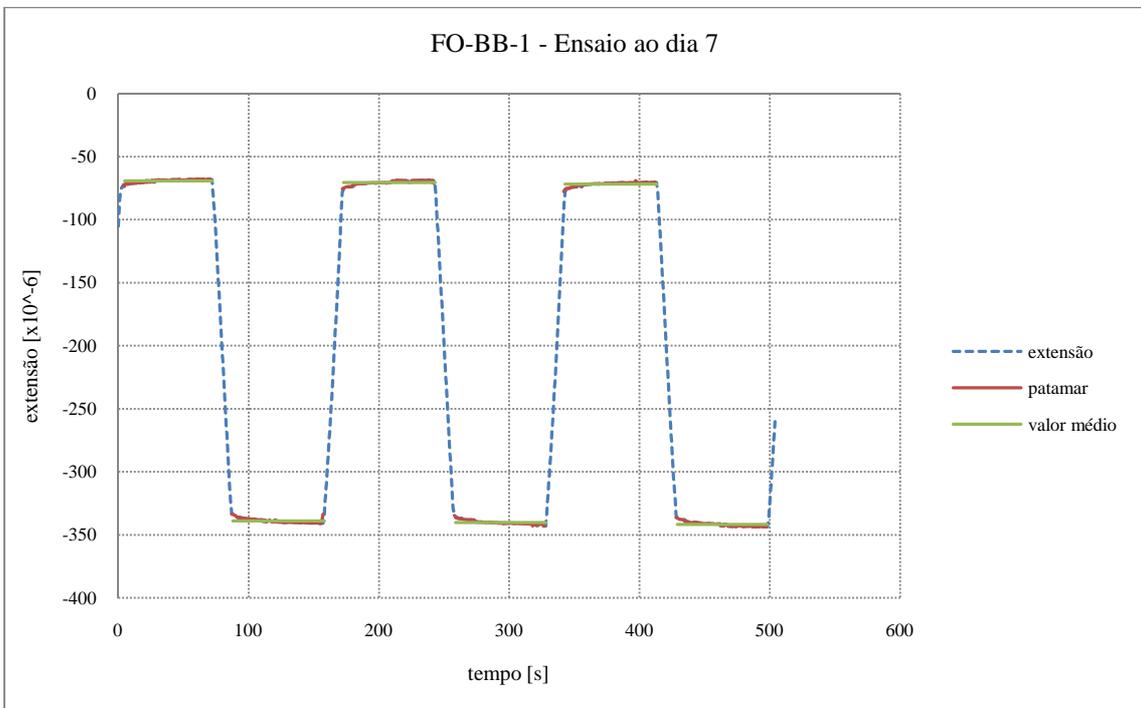


Figura C.23: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BB-1 aos 7 dias

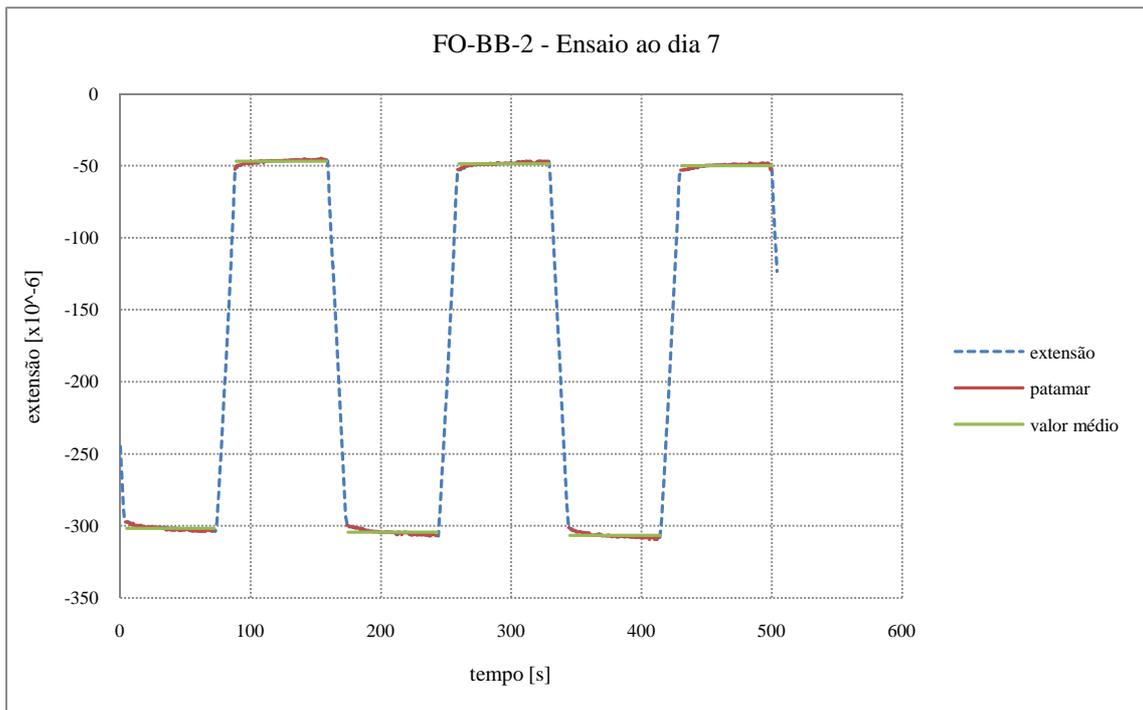


Figura C.24: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BB-2 aos 7 dias

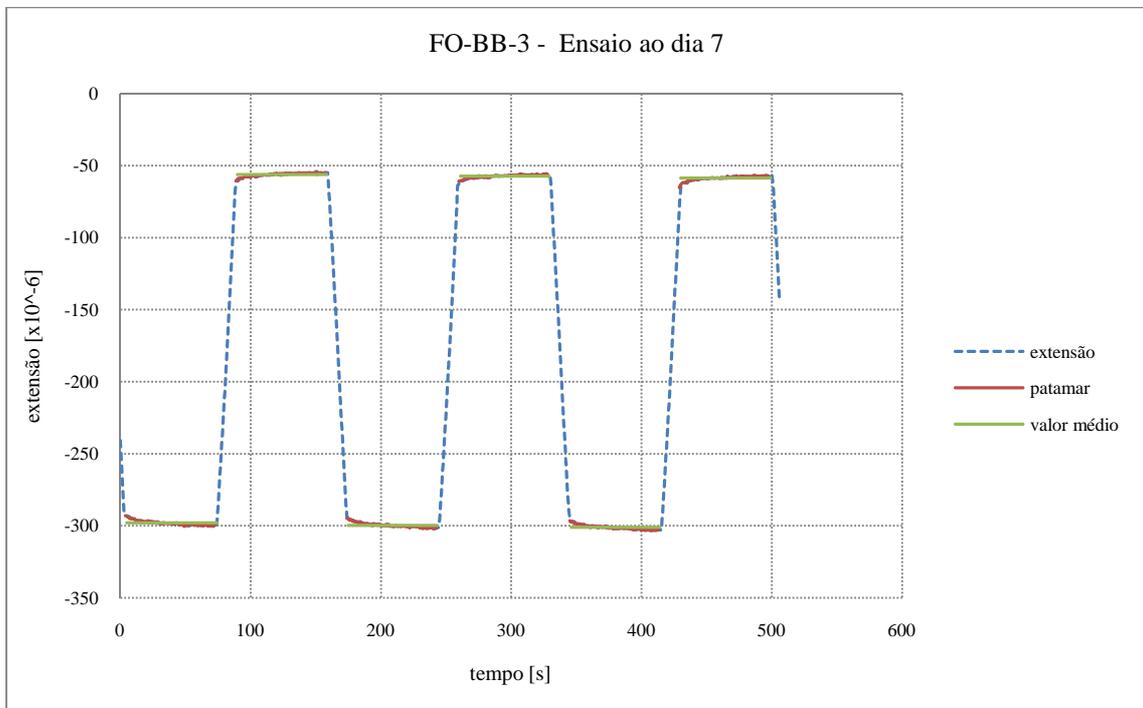


Figura C.25: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BB-3 aos 7 dias

Tabela C.7: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de resistência eléctrica tipo Carlson aos 7 dias, betão de barragens

CA-BB-1				CA-BB-2				CA-BB-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	8,0	ϵ_{\max_1}	-298,75	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-35,17	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	7,59
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	24,68	σ_{\max_1}	8,0	ϵ_{\max_1}	-388,63	σ_{\max_1}	8,0	ϵ_{\max_1}	-341,42
σ_{\max_2}	8,0	ϵ_{\max_2}	-300,65	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-42,56	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	1,93
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	25,52	σ_{\max_2}	8,0	ϵ_{\max_2}	-395,62	σ_{\max_2}	8,0	ϵ_{\max_2}	-343,41
σ_{\max_3}	8,0	ϵ_{\max_3}	-313,82	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-49,77	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-2,95
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	24,77	σ_{\max_3}	8,0	ϵ_{\max_3}	-399,54	σ_{\max_3}	8,0	ϵ_{\max_3}	-354,56

Tabela C.8: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de fibra óptica aos 7 dias, betão de barragens

FO-BB-1				FO-BB-2				FO-BB-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-69,17	σ_{\max_1}	8,0	ϵ_{\max_1}	-301,64	σ_{\max_1}	8,0	ϵ_{\max_1}	-298,00
σ_{\max_1}	8,0	ϵ_{\max_1}	-338,86	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-46,87	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-56,21
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-70,56	σ_{\max_2}	8,0	ϵ_{\max_2}	-304,26	σ_{\max_2}	8,0	ϵ_{\max_2}	-299,58
σ_{\max_2}	8,0	ϵ_{\max_2}	-340,14	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-48,58	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-57,35
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-71,69	σ_{\max_3}	8,0	ϵ_{\max_3}	-306,56	σ_{\max_3}	8,0	ϵ_{\max_3}	-301,11
σ_{\max_3}	8,0	ϵ_{\max_3}	-341,64	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-49,87	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-58,68

C.2.2. Ensaio ao 28º dia

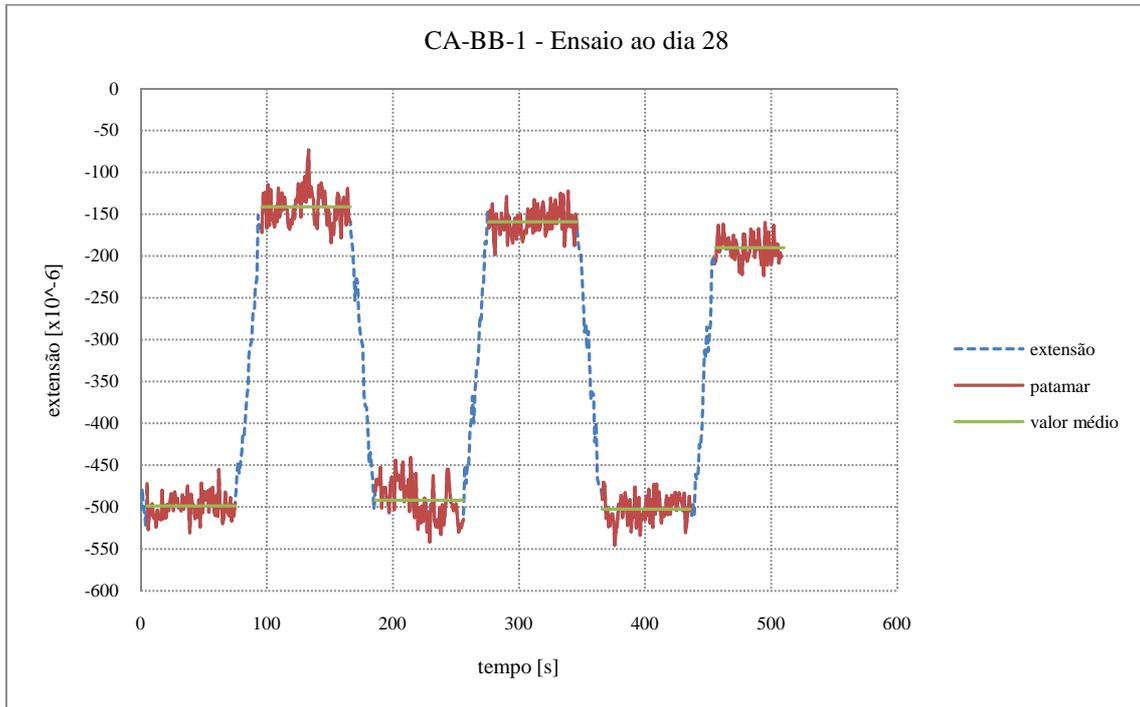


Figura C.26: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CA-BB-1 aos 28 dias

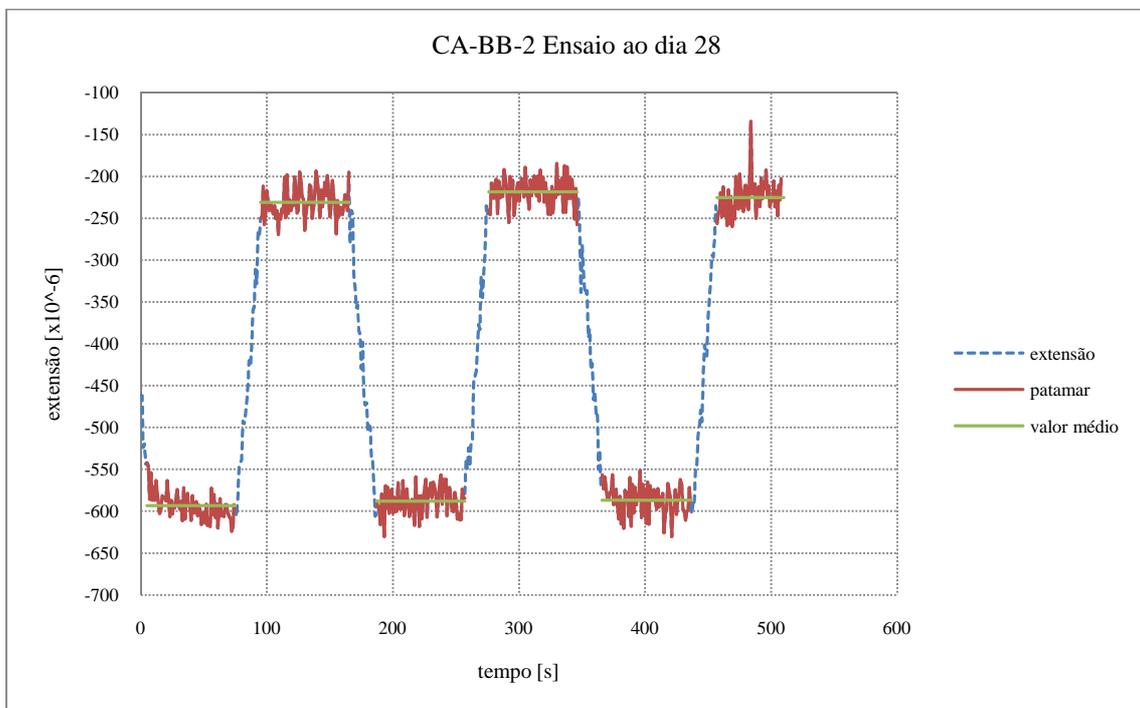


Figura C.27: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CA-BB-2 aos 28 dias

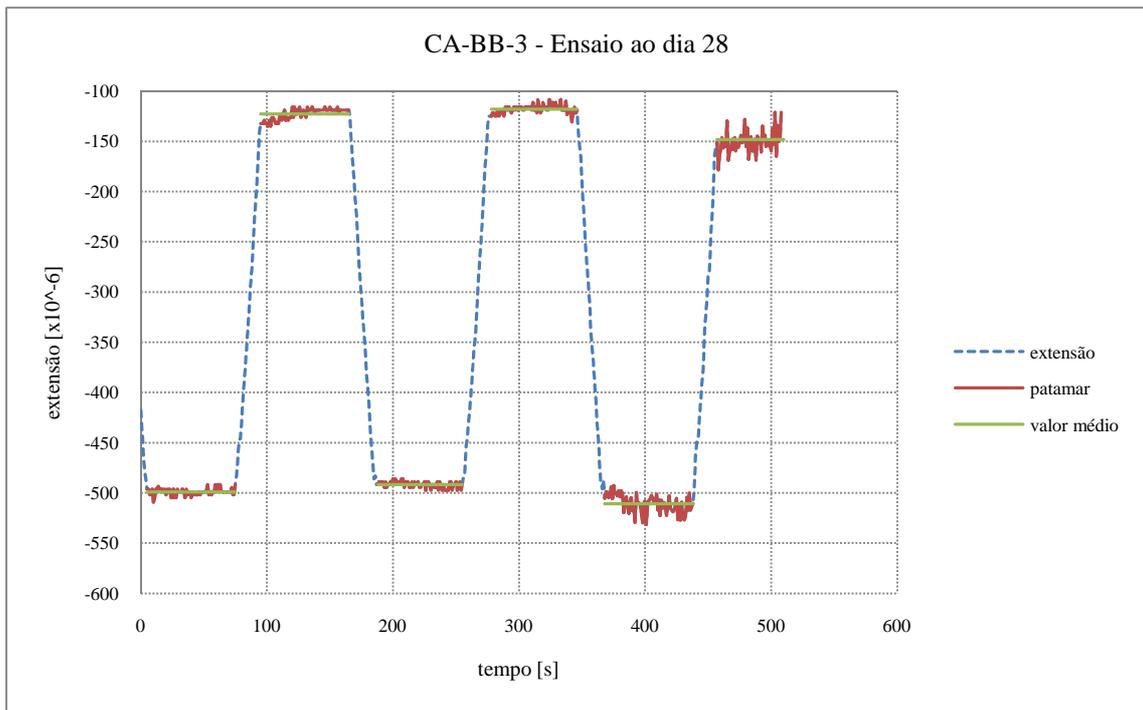


Figura C.28: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CA-BB-3 aos 28 dias

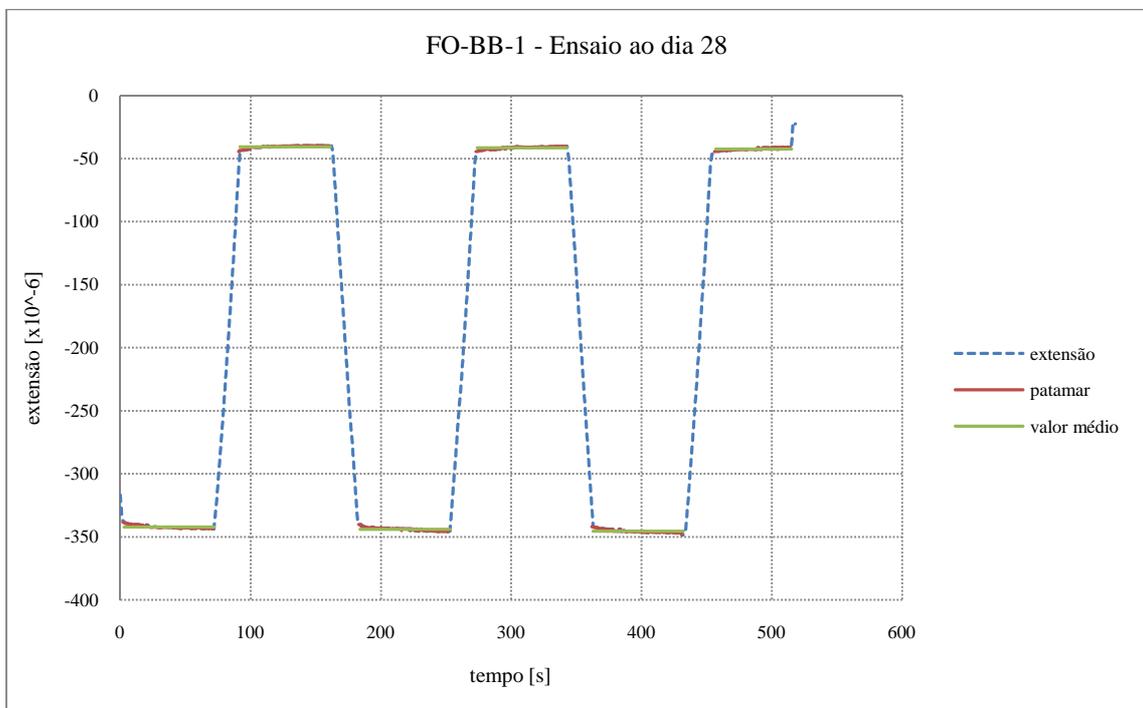


Figura C.29: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BB-1 aos 28 dias

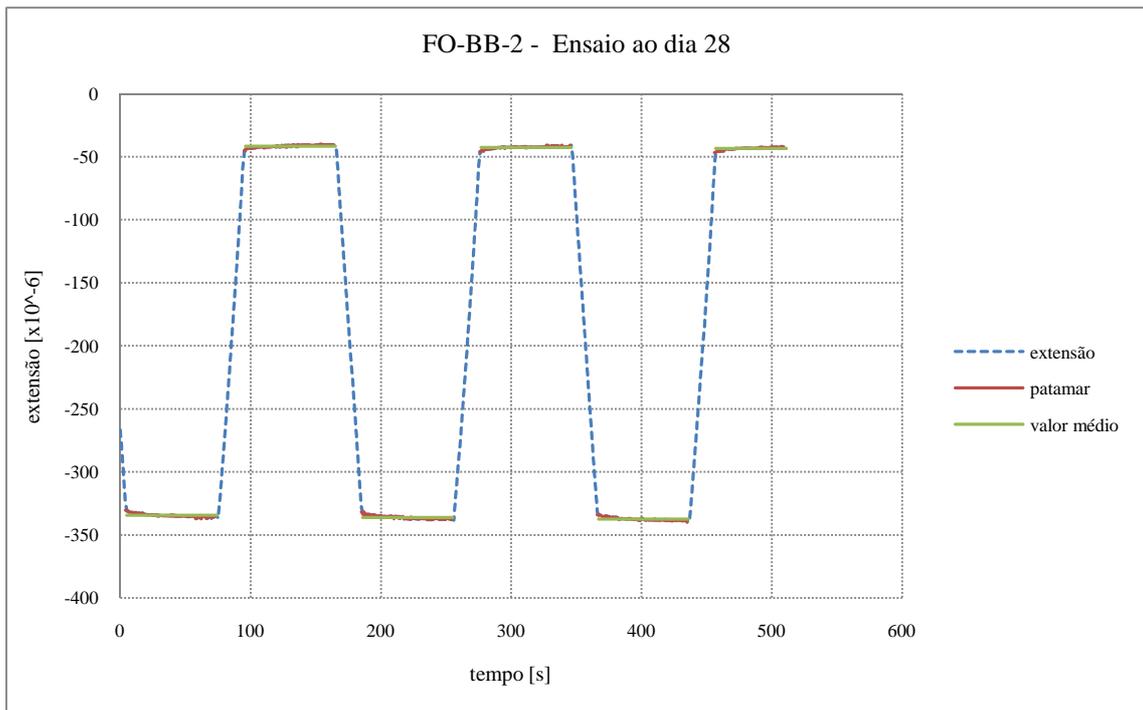


Figura C.30: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BB-2 aos 28 dias

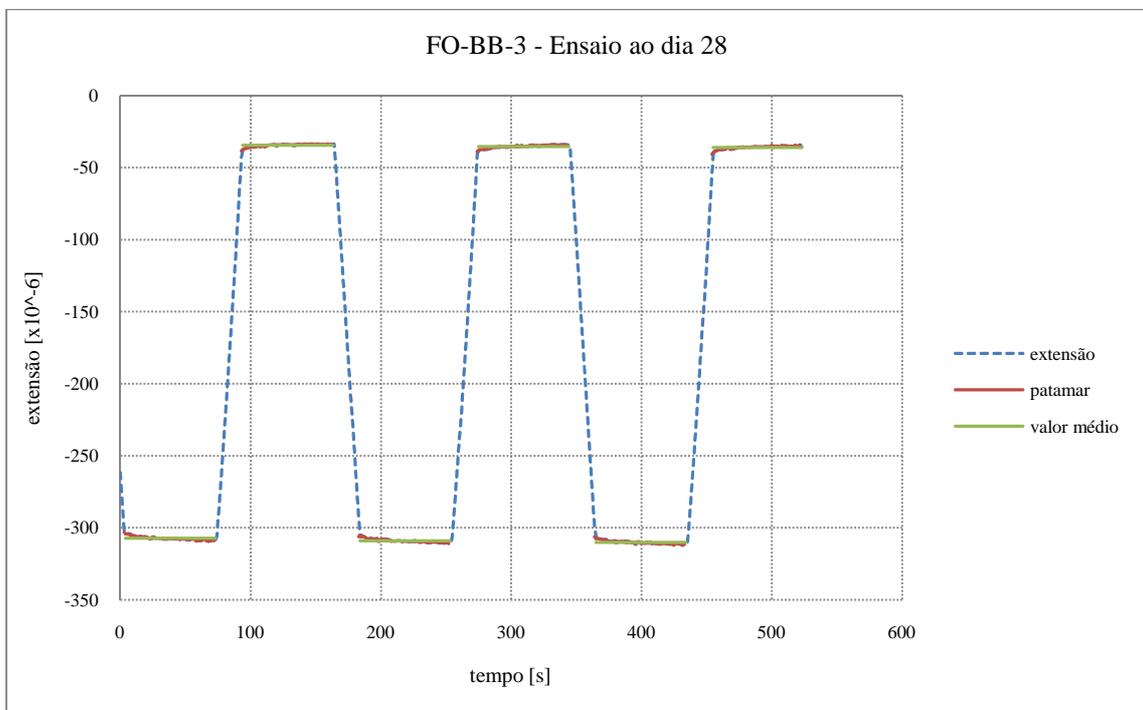


Figura C.31: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BB-3 aos 28 dias

Tabela C.9: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de resistência eléctrica tipo Carlson aos 28 dias, betão de barragens

CA-BB-1				CA-BB-2				CA-BB-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-498,84	σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-593,52	σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-499,02
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-141,15	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-231,02	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-122,70
σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-491,85	σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-588,01	σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-491,80
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-159,27	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-218,53	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-117,84
σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-502,54	σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-586,68	σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-510,69
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-190,22	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-225,28	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-148,06

Tabela C.10: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de fibra óptica aos 28 dias, betão de barragens

FO-BB-1				FO-BB-2				FO-BB-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-342,12	σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-334,52	σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-307,25
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-40,52	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-41,60	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-34,53
σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-343,94	σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-336,17	σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-308,96
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-41,41	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-42,60	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-35,31
σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-345,57	σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-337,46	σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-310,07
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-42,46	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-43,31	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-35,99

C.2.3. Ensaio ao 90º dia

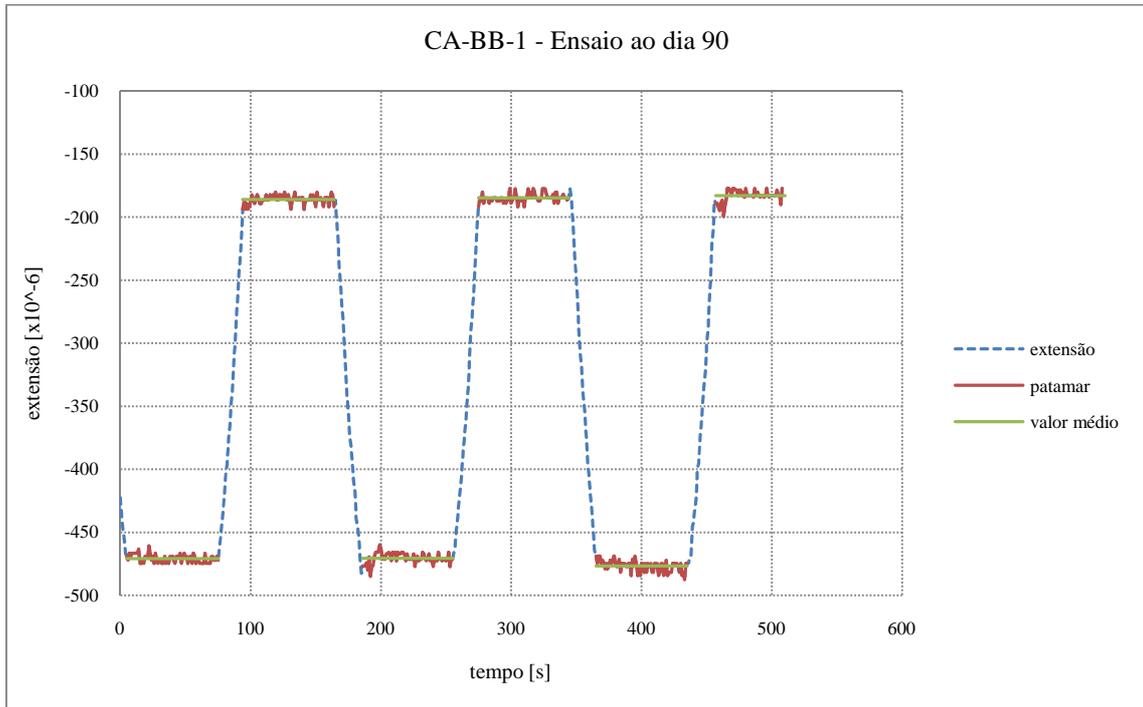


Figura C.32: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CA-BB-1 aos 90 dias

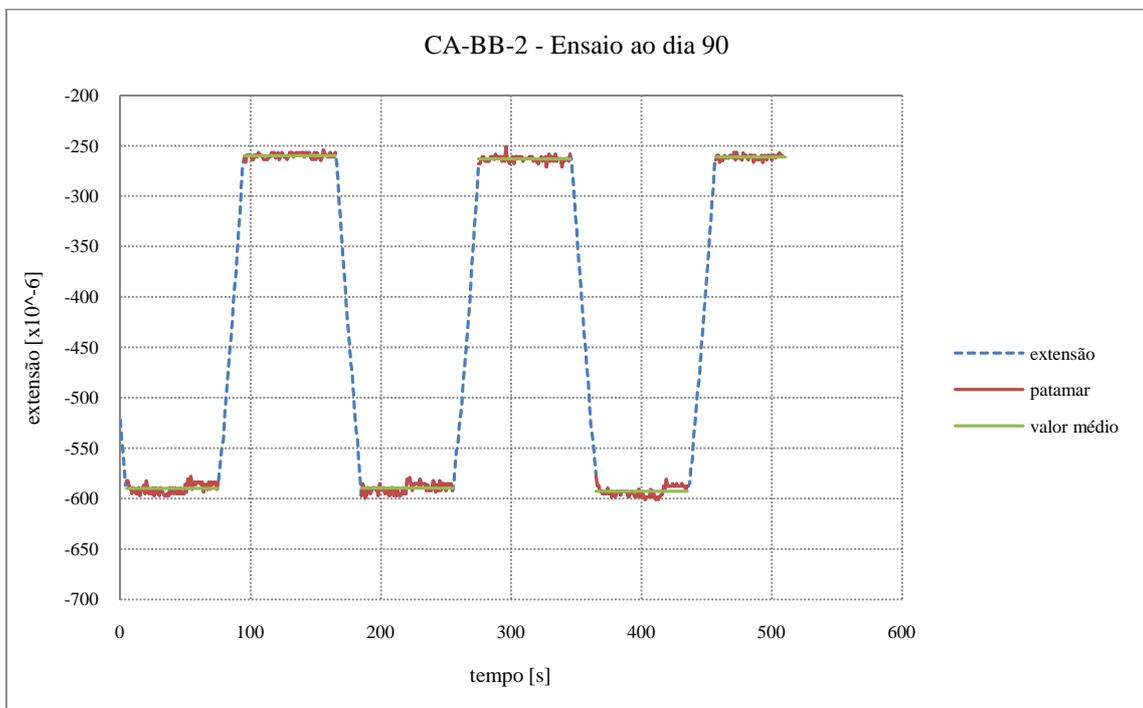


Figura C.33: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CA-BB-2 aos 90 dias

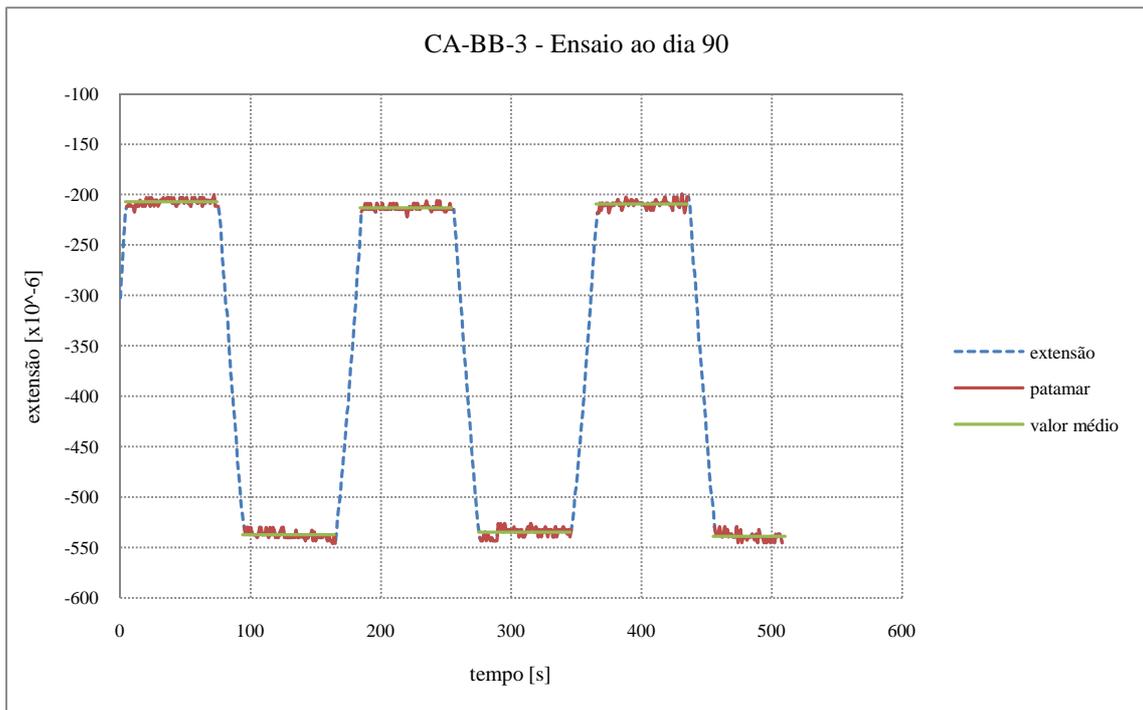


Figura C.34: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor CA-BB-3 aos 90 dias

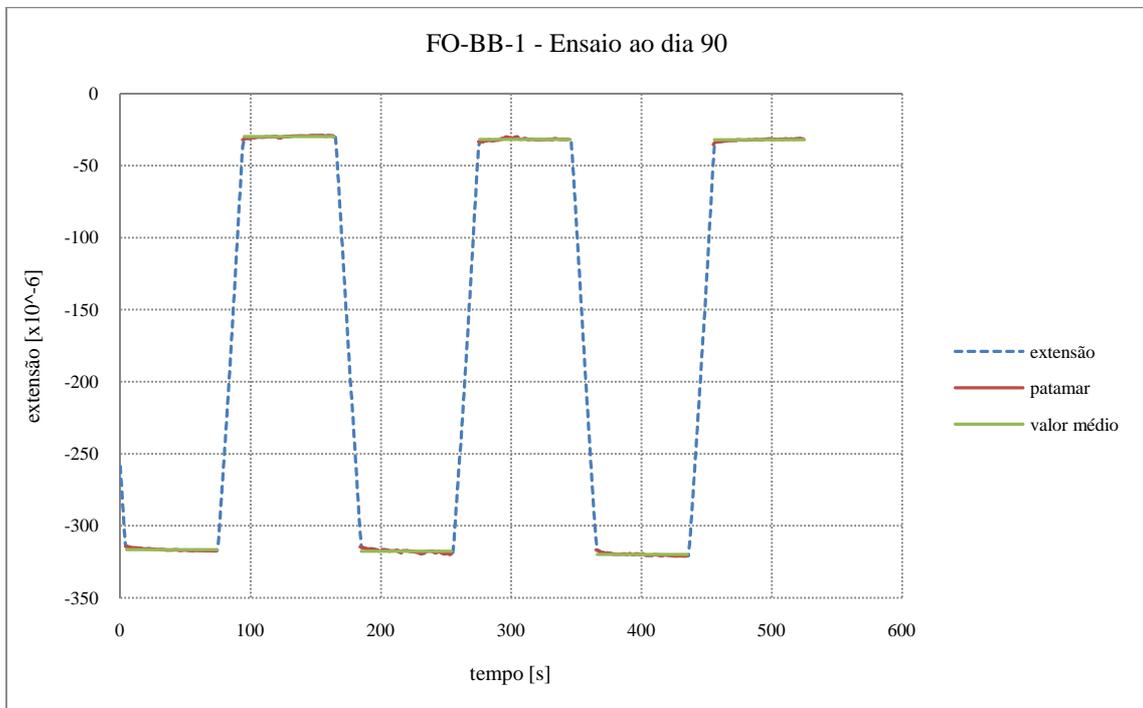


Figura C.35: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BB-1 aos 90 dias

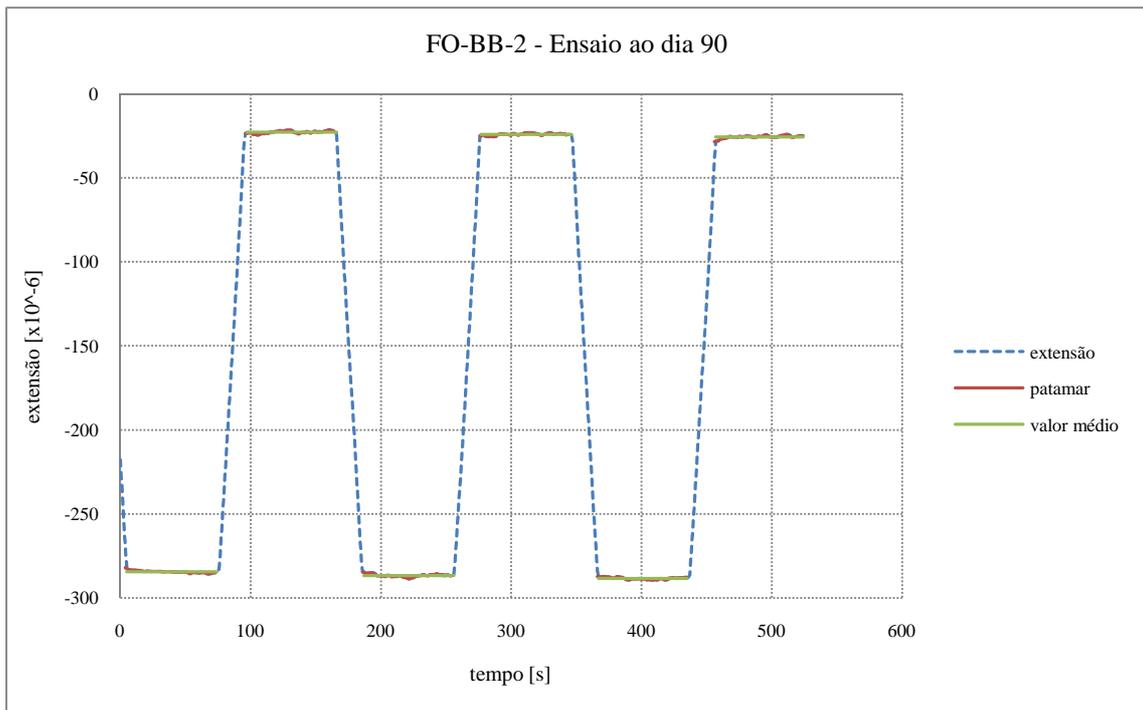


Figura C.36: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BB-2 aos 90 dias

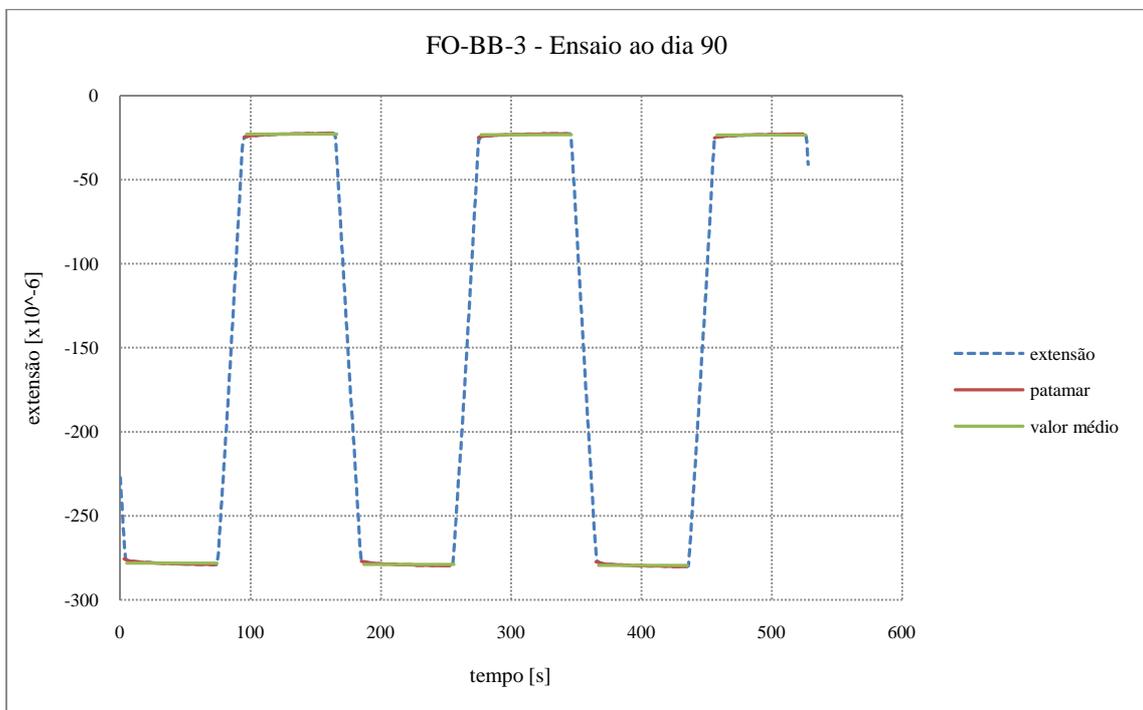


Figura C.37: Diagrama dum ensaio para determinação do módulo de elasticidade, leitura através do sensor FO-BB-3 aos 90 dias

Tabela C.11: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de resistência eléctrica tipo Carlson aos 90 dias, betão de barragens

CA-BB-1				CA-BB-2				CA-BB-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-470,78	σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-589,82	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-207,28
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-186,04	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-259,91	σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-537,39
σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-470,51	σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-589,64	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-213,21
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-184,68	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-263,06	σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-534,74
σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-476,72	σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-592,82	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-209,28
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-182,91	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-261,32	σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-539,00

Tabela D.12: Valores de extensão obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade para os sensores de fibra óptica aos 90 dias, betão de barragens

FO-BB-1				FO-BB-2				FO-BB-3			
Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]		Tensão σ [MPa]		Extensão ϵ [$\mu\epsilon$]	
σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-316,48	σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-284,43	σ_{\max_1}	10,2	ϵ_{\max_1}	-278,19
σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-29,86	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-22,91	σ_{\min_1}	0,6	ϵ_{\min_1}	-22,97
σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-317,57	σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-286,62	σ_{\max_2}	10,2	ϵ_{\max_2}	-278,97
σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-31,75	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-24,22	σ_{\min_2}	0,6	ϵ_{\min_2}	-23,19
σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-319,90	σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-288,36	σ_{\max_3}	10,2	ϵ_{\max_3}	-279,50
σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-32,10	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-25,70	σ_{\min_3}	0,6	ϵ_{\min_3}	-23,41