

# **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS**

**AUGUSTO MIGUEL MONTEIRO PEDROSO FARIA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientador: Professor Doutor Joaquim de Azevedo Figueiras

---

Co-Orientador: Professor Doutor Rui Marques de Faria

JULHO DE 2010

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais e Irmão



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de deixar o meu mais profundo reconhecimento a todos os que me auxiliaram na realização desta dissertação, pela sua disponibilidade, dedicação e compreensão, fundamentais para os resultados conseguidos, bem como aqueles que sempre me acompanharam ao longo dos últimos anos de formação académica.

Ao Professor Joaquim Figueiras, orientador da dissertação, pelos conhecimentos transmitidos e entusiasmo demonstrado ao longo da realização deste trabalho.

Ao Professor e co-orientador Rui Faria, um agradecimento especial pela disponibilidade na troca de impressões sobre alguns fenómenos estruturais, pela discussão e interpretação de resultados experimentais e fundamentalmente, pela motivação dada no decorrer da minha formação académica, a qual conduziu à minha entrega às Estruturas.

Ao Professor Adriano Carvalho e ao colega João Ferreira, pela partilha dos seus conhecimentos de electrotecnia, sentido de responsabilidade e espírito de trabalho em equipa, fundamentais ao bom desenvolvimento de um projecto numa área multidisciplinar como a Civiónica.

Aos Engenheiros Carlos Rodrigues, Filipe Cavadas e Rémy de Faria, pelos esclarecimentos prestados relativos à Monitorização, pelo apoio na condução de ensaios e aplicações em obra e pela ajuda na interpretação dos resultados obtidos.

Aos técnicos do LABEST, Cláudio Ferraz e Paula Silva, pelo auxílio na instalação dos sistemas de monitorização em laboratório e em obra.

Aos meus amigos e colegas de curso, por terem feito parte de tamanha etapa da minha vida. Sou obrigado a destacar a amizade, o companheirismo e a compreensão da Carina Freitas, do Carlos Cunha, do Marco Fernandes, do José Barros e do Vincent Rodrigues, que estiveram sempre presentes nos cinco anos do Mestrado Integrado. Pelas inúmeras horas nos “sofás do DEC” um muito obrigado!

À Paula Campelo, pela amizade, verdadeira e desmesurada que nos une há tantos e tantos anos. Pela tua presença constante, pelas tuas palavras e pelos teus conselhos, senti-me na obrigação de distinguir o papel fundamental que desempenhaste, não nos últimos cinco anos de formação curricular, mas nos últimos treze anos de formação pessoal.

À Paola Elizalde, por todos os momentos partilhados e pelo carinho e compreensão que teve para comigo nestes últimos meses. A tua contribuição para o resultado final que aqui apresento ultrapassa largamente as tardes intermináveis de pesquisa bibliográfica em San Sebastian ou os conselhos relativos à organização da dissertação. Obrigado por teres tornado inesquecível este ano de mudança, e, principalmente, por me ajudares nas alturas em que essa mudança mais exigiu de mim.

Por último, aos meus pais e irmão, a quem dedico este trabalho. Pela vossa compreensão, pelo constante estímulo académico, por todo o vosso carinho e pelo apoio incondicional nesta e em tantas outras etapas, o meu mais sincero obrigado.



## **RESUMO**

Nos últimos anos, devido à crescente percepção por parte da sociedade relativamente às consequências sociais e económicas da ocorrência de acidentes ou avarias graves em grandes infra-estruturas de Engenharia Civil, tem-se verificado um aumento da consciencialização dos Donos de Obra para a importância da monitorização estrutural. Por outro lado, na sequência de uma mudança de paradigma no sector da construção civil e obras públicas, onde a construção nova tende a ser preterida face à reabilitação e conservação das obras existentes, actualmente a monitorização assume-se como uma ferramenta essencial na gestão e manutenção do seu comportamento estrutural. Desta forma, o desenvolvimento verificado ao nível dos sistemas de monitorização tem sido notável, possibilitando aprofundar o conhecimento do comportamento das estruturas sob condições de serviço, otimizar o respectivo dimensionamento ou reforço e gerir os programas de manutenção.

Devido aos progressos da tecnologia dos sensores, dos sistemas de aquisição e demais subsistemas constituintes, importa estudar esta mesma tecnologia de modo a poder avaliar-se o seu desempenho em aplicações de engenharia civil. É precisamente neste âmbito que se insere a presente dissertação.

Numa primeira fase discutem-se os diferentes processos de medição de grandezas que mais correntemente têm sido utilizadas na observação do comportamento de estruturas e as diversas partes constituintes de um sistema de monitorização. Expõe-se também conhecimentos teóricos necessários para entender o funcionamento dos tipos de sensores mais correntemente utilizados para medir flechas, rotações, extensões, acelerações e temperatura.

Seguidamente, apresentam-se os ensaios laboratoriais conduzidos com o intuito de avaliar o desempenho de redes de sensores eléctricos e ópticos, bem como dos sistemas de aquisição associados a estas. Neste estudo comparam-se as grandezas medidas na estrutura, a qual consiste num perfil metálico simplesmente apoiado carregado por duas forças pontuais na zona central do vão, com as previstas pela bibliografia e pela modulação numérica da mesma.

Por último, face ao interesse da monitorização em obras de maior dimensão, com sistemas estruturais complexos, inclui-se como caso de estudo o plano de acompanhamento do comportamento estrutural de um viaduto do Metro do Porto. Aborda-se assim, o tema da monitorização e instrumentação de obras numa escala real, onde as adversidades e os problemas levantados diferem substancialmente dos apresentados aquando da aplicação de sistemas de monitorização em laboratório.

**PALAVRAS-CHAVE:** sistemas de monitorização, sistemas de aquisição, sensores eléctricos, sensores ópticos, comportamento estrutural.



## **ABSTRACT**

In the last years, not only the number of civil engineering works has increased, but also their complexity. By means of new structural systems and highly developed projects, construction engineers, design teams and overall society have realized how important it is to monitor the condition of these works, especially when economic and social consequences may derive from their loss. On the other hand, the consciousness in structural health's monitoring role has increased, due to the adjustment on how the construction sector functions.

Nowadays, since there is the need of investing more in rehabilitation and maintenance works in the existing constructions, monitoring their structural behaviour is seen as an essential action to be taken. The development of Structural Health Monitoring (SHM) systems has been remarkable, since they are now capable of increasing the understanding of structures' response in serviceability state, optimizing some of its design techniques and managing maintenance programs.

As a result of all the progresses in sensors technology, data acquisition systems and further parts of a SHM system, it is of major importance to study this technology in order to be able to assess its performance in civil engineering applications. This represents exactly the scope of work of this thesis.

First of all, one discusses processes of measuring structural properties, specifying those that have been used more often in the observation of structures' response. Moreover, it is also presented the different parts a SHM system comprises. In order to acknowledge how various types of sensors and remaining components of a SHM system work, a theoretical background is given.

Secondly, laboratory tests are carried out with the purpose of analysing various types of sensors, such as electrical ones and sensors based on fiber-optic technology. Presented in Chapters 3, 4 and 5, here one compares the structure's results acquired in the experiments with the values from the Mechanics of Materials' theory, as well as with the ones obtained from a finite element model.

Finally it is included a case study concerning the monitoring plan of a railway bridge and its structural behaviour. In this chapter, the main goal is to analyse a bigger scale SHM system, which is installed in a much more complicated structure and in harsher conditions. Therefore, one expects the SHM system to exhibit different types of practical problems than the ones presented and predicted during the applications in laboratory.

**KEYWORDS:** structural health monitoring, data acquisition systems, electrical sensors, fiber-optic sensors, structural behaviour.



## ÍNDICE GERAL

|  |     |
|--|-----|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....  | i   |
| <b>RESUMO</b> .....  | iii |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | v   |
| <br>   |     |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | 1   |
| 1.1. MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS .....                             | 1   |
| 1.2. OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....                 | 3   |
| <br>   |     |
| <b>2. SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL</b> .....               | 5   |
| 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....                                  | 5   |
| 2.2. MEDIÇÕES DE GRANDEZAS ESTRUTURAIS .....                       | 6   |
| 2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                                   | 6   |
| 2.2.2. MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS .....                             | 6   |
| 2.2.3. MEDIÇÃO DE ROTAÇÃO .....                                    | 8   |
| 2.2.4. MEDIÇÃO DE EXTENSÕES.....                                   | 9   |
| 2.2.5. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....                                 | 12  |
| 2.2.6. MEDIÇÃO DE ACELERAÇÃO.....                                  | 14  |
| 2.3. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO .....                                | 17  |
| 2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                                   | 17  |
| 2.3.2. REDE DE SENSORES .....                                      | 18  |
| 2.3.3. SISTEMAS DE AQUISIÇÃO .....                                 | 19  |
| 2.3.4. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO .....                               | 23  |
| 2.3.5. PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE DADOS.....                 | 23  |
| 2.3.6. TRATAMENTO DE DADOS E DIAGNÓSTICO.....                      | 24  |
| 2.4. REDES DE SENSORES SEM FIOS .....                              | 24  |
| 2.5. REDES DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.....                        | 26  |
| 2.5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                                   | 26  |
| 2.5.2. SENSORES BASEADOS NA MODULAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA ..... | 27  |
| 2.5.3. SENSORES BASEADOS NA MODULAÇÃO DA FASE .....                | 31  |
| 2.6. MONITORIZAÇÃO EM DIFERENTES FASES DE INTERVENÇÃO .....        | 32  |
| 2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                    | 34  |

|   |    |
|---|----|
| <b>3. CASO DE ESTUDO PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO</b> .....          | 35 |
| <b>3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....  | 35 |
| <b>3.2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA</b> .....  | 36 |
| 3.2.1. GEOMETRIA DO MODELO .....  | 36 |
| 3.2.2. SISTEMA DE CARREGAMENTO .....  | 37 |
| 3.2.3. CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA .....  | 38 |
| <b>3.3. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO</b> .....  | 43 |
| 3.3.1. REDE DE SENSORES .....   | 43 |
| 3.3.2. SISTEMAS DE AQUISIÇÃO.....   | 45 |
| <b>3.4. PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS</b> .....                                       | 47 |
| <br>  |    |
| <b>4. AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO DESEMPENHO DE SENSORES ELÉCTRICOS</b> .....         | 49 |
| <b>4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....  | 49 |
| <b>4.2. ENSAIO ESTÁTICO 1</b> .....   | 50 |
| <b>4.3. ENSAIO ESTÁTICO 2</b> .....   | 56 |
| <b>4.4. ENSAIO ESTÁTICO 3</b> .....   | 59 |
| <b>4.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS RELATIVOS AOS ENSAIOS ESTÁTICOS 1, 2 E 3</b> ..... | 62 |
| <b>4.6. ENSAIO ESTÁTICO 4</b> .....   | 63 |
| 4.6.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS .....                     | 63 |
| 4.6.2. MEDIÇÕES DE ROTAÇÕES COM INCLINÓMETROS .....                                 | 67 |
| 4.6.3. MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS COM LVDT .....                                     | 72 |
| <b>4.7. ENSAIO ESTÁTICO 5</b> .....   | 76 |
| 4.7.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS .....                     | 76 |
| 4.7.2. MEDIÇÕES DE ROTAÇÕES COM INCLINÓMETROS .....                                 | 79 |
| 4.7.3. MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS COM LVDT .....                                     | 82 |
| <b>4.8. MODELAÇÃO DA VIGA COM RECURSO AO MEF</b> .....                              | 84 |
| 4.8.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....   | 84 |
| 4.8.2. REGISTO DE OBSERVAÇÕES .....   | 84 |
| 4.8.3. COMPARAÇÃO DO MODELO COM O SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO .....                    | 86 |
| <b>4.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | 90 |
| <br>  |    |
| <b>5. AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO DESEMPENHO DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA</b> .....    | 93 |
| <b>5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....  | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.1.1. INSTALAÇÃO DOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA .....                           | 95  |
| <b>5.2. ENSAIO ESTÁTICO 6</b> .....  | 96  |
| 5.2.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉTRICOS .....                 | 96  |
| 5.2.2. MEDIÇÕES COM EXTENSÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA .....                        | 97  |
| 5.2.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS EXTENSÓMETROS EM FIBRA ÓPTICA.....            | 98  |
| 5.2.4. COMPARAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS ELÉTRICOS E DE FIBRA ÓPTICA .....          | 101 |
| <b>5.3. ENSAIO ESTÁTICO 7</b> .....  | 104 |
| 5.3.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉTRICOS .....                 | 104 |
| 5.3.2. MEDIÇÕES COM EXTENSÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA.....                         | 105 |
| 5.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS EXTENSÓMETROS EM FIBRA ÓPTICA.....            | 105 |
| 5.3.4. COMPARAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS ELÉTRICOS E DE FIBRA ÓPTICA .....          | 107 |
| <b>5.4. ENSAIO ESTÁTICO 8</b> .....  | 110 |
| 5.4.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉTRICOS .....                 | 110 |
| 5.4.2. MEDIÇÕES COM EXTENSÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA.....                         | 111 |
| 5.4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS EXTENSÓMETROS EM FIBRA ÓPTICA.....            | 112 |
| 5.4.4. COMPARAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS ELÉTRICOS E DE FIBRA ÓPTICA .....          | 113 |
| <b>5.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM MODELO NUMÉRICO</b> .....                 | 116 |
| <b>5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....   | 117 |
| <br>   |     |
| <b>6. MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM VIADUTO DO METRO DO PORTO</b> ..... | 119 |
| <b>6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....                                       | 119 |
| <b>6.2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA</b> .....                                       | 120 |
| 6.2.1. TABULEIRO DO VIADUTO.....   | 122 |
| 6.2.2. PILARES DO VIADUTO.....   | 123 |
| 6.2.3. FUNDAÇÕES E ENCONTROS DO VIADUTO .....                                  | 124 |
| <b>6.3. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO</b> .....                                     | 125 |
| 6.3.1. REDE DE SENSORES .....  | 125 |
| 6.3.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO .....  | 128 |
| 6.3.3. INSTALAÇÃO DA REDE DE SENSORES EM OBRA .....                            | 128 |
| <b>6.4. PROCEDIMENTO DO ENSAIO</b> .....                                       | 130 |
| 6.4.1. CARACTERÍSTICAS DO VEÍCULO TIPO.....                                    | 132 |
| <b>6.5. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS</b> .....                            | 133 |
| 6.5.1. ENSAIO 1 - PASSAGENS NA ZONA B .....                                    | 133 |
| 6.5.2. ENSAIO 2 – PASSAGENS NA ZONA A .....                                    | 141 |
| <b>6.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....   | 147 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> ..... | 149 |
| <b>7.1. CONCLUSÕES</b> .....                                    | 149 |
| <b>7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....                      | 151 |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                                       | 153 |

## INDICE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Fig. 1.1 – Classificação de sistemas por níveis de complexidade (Adaptado de Bisby, 2005).....                         | 2  |
| Fig. 2.1 – LVDT to tipo ACT da marca RDP. ....   | 7  |
| Fig. 2.2 – Esquema de LVDT: a) circuito eléctrico; b) curva característica (Figueiredo, 2006). ....                    | 7  |
| Fig. 2.3 – Inclínómetro eléctrico da série LSO da <i>Jewell Instruments</i> . ....                                     | 9  |
| Fig. 2.4 – Extensómetros: a) de resistência eléctrica da <i>Omega</i> ; b) de fibra óptica da <i>FiberSensing</i> . 10 |    |
| Fig. 2.5 – Extensómetro de resistência eléctrica (Félix, 2004). ....   | 11 |
| Fig. 2.6 – Sensor de temperatura PT100: a) encapsulado; b) película fina da <i>PicoTechnology</i> .....                | 13 |
| Fig. 2.7 – Piezoeléctrico: a) esquema de funcionamento; b) modelo da PCB (Figueiredo, 2006).....                       | 14 |
| Fig. 2.8 – Acelerómetro capacitivo: a) esquema de funcionamento; b) modelo da <i>Crossbow</i> .....                    | 15 |
| Fig. 2.9 – Esquema de ligação do sensor tipo MEMS: a) de um eixo; b) de dois eixos.....                                | 16 |
| Fig. 2.10 – Acelerómetro do tipo MEMS, modelo ADXL330, da <i>Analog Devices</i> .....                                  | 16 |
| Fig. 2.11 – Esquema geral de um sistema de monitorização (Félix, 2004).....  | 17 |
| Fig. 2.12 – Esquema de um sistema de conversão A/D (Dally et al, 1993). ....   | 19 |
| Fig. 2.13 – Posto de observação equipado com DT800. ....   | 20 |
| Fig. 2.14 – Sistema de aquisição <i>CompactRIO</i> da <i>National Instruments</i> . ....                               | 20 |
| Fig. 2.15 – Comparação da reprodução dos dados em função da frequência (Figueiredo, 2006). ....                        | 23 |
| Fig. 2.16 – Tipologias de RSSF. ....   | 25 |
| Fig. 2.17 – Luz reflectida no interior de uma fibra óptica (Félix, 2004). ....   | 27 |
| Fig. 2.18 – Constituição de uma fibra óptica (Félix, 2004).....  | 27 |
| Fig. 2.19 – Princípio de funcionamento dos sensores de <i>Bragg</i> (Félix, 2004). ....                                | 28 |
| Fig. 2.20 – Técnica de multiplexagem espacial (Félix, 2004). ....  | 29 |
| Fig. 2.21 – Representação de sistema de aquisição de redes de <i>Bragg</i> (Félix, 2004). ....                         | 30 |
| Fig. 2.22 – Monitorização da temperatura com sensores de <i>Bragg</i> (Frazão et al., 2005).....                       | 30 |
| Fig. 2.23 – Configurações de sensores interferométricos: a) <i>Michelson</i> ; b) <i>Fabry-Perot</i> (Félix, 2004).31  |    |
| Fig. 3.1 – Geometria do modelo e envolvente. ....  | 36 |
| Fig. 3.2 – Dimensões exactas da secção em [mm]. ....   | 37 |
| Fig. 3.3 – Esquema estrutural da viga e esforços internos. ....  | 37 |
| Fig. 3.4 – Actuador hidráulico manual. ....  | 38 |
| Fig. 3.5 – Célula de carga ligada ao actuador. ....  | 38 |
| Fig. 3.6 – Ensaio cíclico realizado: a) Ciclos de Carga/descarga; b) Sinais de saída recebidos. ....                   | 39 |
| Fig. 3.7 – a) $C_1=0,02437$ kN/ppm; b) $C_2=0,02433$ kN/ppm; c) $C_3=0,02435$ kN/ppm. ....                             | 40 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 3.8 – Primeiro ensaio com patamares: a) Carga/descarga; b) Sinais de saída recebidos. ....                  | 40 |
| Fig. 3.9 – Segundo ensaio com patamares: a) Carga/descarga; b) Sinais de saída recebidos. ....                   | 41 |
| Fig. 3.10 – Terceiro ensaio com patamares: a) Carga/descarga; b) Sinais de saída recebidos. ....                 | 41 |
| Fig. 3.11 – a) $C_1=0,02465\text{kN/ppm}$ ; b) $C_2=0,02463\text{kN/ppm}$ ; c) $C_3=0,02438\text{kN/ppm}$ . .... | 41 |
| Fig. 3.12 – Representação longitudinal da rede de sensores. ....   | 44 |
| Fig. 3.13 – Secções transversais e rede de sensores instalada. ....  | 44 |
| Fig. 3.14 – Sistema de aquisição DT800 instalado no laboratório. ....  | 45 |
| Fig. 3.15 – Sistemas de aquisição: a) <i>CompactDAQ</i> ; b) <i>CompactRIO</i> . ....                            | 45 |
| Fig. 3.16 – Sistema de Aquisição da <i>MicronOptics</i> , sm130. ....  | 46 |
| Fig. 4.1 – Perfil metálico HEB100 a ensaiar em laboratório. ....   | 50 |
| Fig. 4.2 – Medições com extensómetros: a) variação do sinal; b) conversão em extensão. ....                      | 51 |
| Fig. 4.3 – Estudo dos extensómetros: a) banzo inferior; b) banzo superior. ....                                  | 51 |
| Fig. 4.4 – Desvio dos extensómetros em relação à media: a) banzo inferior; b) banzo superior. ....               | 52 |
| Fig. 4.5 – Estudo dos extensómetros: a) Secção S1, b) Secção S2; c) Secção S3. ....                              | 52 |
| Fig. 4.6 – Localização transversal da rede de extensómetros eléctricos. ....                                     | 53 |
| Fig. 4.7 – Relação tensão/extensão: a) ERE2; b) ERE4. ....   | 54 |
| Fig. 4.8 – Relação tensão/extensão: a) ERE5; b) ERE7. ....   | 54 |
| Fig. 4.9 – Relação tensão/extensão: a) ERE10; b) ERE12. ....   | 54 |
| Fig. 4.10 – Relação tensão/extensão ERE8 e ERE13. ....   | 55 |
| Fig. 4.11 – Ensaio Estático 2. ....  | 56 |
| Fig. 4.12 – Medições com extensómetros: a) variação do sinal; b) conversão em extensão. ....                     | 56 |
| Fig. 4.13 – Estudo Secção S1: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento; c) 3º Carregamento. ....                   | 58 |
| Fig. 4.14 – Ensaio Estático 3. ....  | 59 |
| Fig. 4.15 – Medições com extensómetros: a) variação do sinal; b) conversão em extensão. ....                     | 59 |
| Fig. 4.16 – Estudo Secção S1: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN. ....   | 60 |
| Fig. 4.17 – Estudo Secção S1: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN. ....   | 60 |
| Fig. 4.18 – Estudo Secção S1, Patamar 50kN. ....   | 61 |
| Fig. 4.19 – Comportamento linear aproximado, Secção S1. ....   | 61 |
| Fig. 4.20 – Ensaio Estático 4. ....  | 63 |
| Fig. 4.21 – Medições com extensómetros: a) sinal de saída; b) conversão em extensão. ....                        | 63 |
| Fig. 4.22 – Estudo da Secção S1: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento; c) 3º Carregamento. ....                | 64 |
| Fig. 4.23 – Diagramas de extensões finais [%]. ....  | 66 |
| Fig. 4.24 – Medições com inclinómetros: a) variação de corrente; b) conversão em rotação. ....                   | 68 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 4.25 – Comparação de rotação: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento; c) 3º Carregamento.   | 68 |
| Fig. 4.26 – Deformação provocada por momento flector positivo (Adaptado de Beer, 1995).          | 69 |
| Fig. 4.27 – Convenções para o cálculo da integração da elástica.                                 | 70 |
| Fig. 4.28 – Estudo de inclinómetros: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento; c) 3º Carregamento. | 71 |
| Fig. 4.29 – Medições com LVDT: a) variação de tensão; b) conversão em deslocamentos.             | 73 |
| Fig. 4.30 – Unidade fictícia de carga: a) Estrutura real; b) Estrutura fictícia.                 | 73 |
| Fig. 4.32 – Estudo de deslocamentos: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento.                     | 74 |
| Fig. 4.33 – Estudo de deslocamentos, 3º Carregamento.  | 75 |
| Fig. 4.34 – Ensaio Estático 5.   | 76 |
| Fig. 4.35 – Medições com extensómetros: a) variação do sinal; b) conversão em extensão.          | 76 |
| Fig. 4.36 – Estudo Secção S1: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN.                                  | 77 |
| Fig. 4.37 – Estudo Secção S1: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN.                                  | 77 |
| Fig. 4.38 – Estudo Secção S1, Patamar 50kN.  | 77 |
| Fig. 4.39 – Diagramas de extensões finais para patamar de 10kN [%].                              | 79 |
| Fig. 4.40 – Medições com inclinómetros: a) variação de corrente; b) conversão em rotação.        | 79 |
| Fig. 4.41 – Estudo de rotações: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN.                                | 80 |
| Fig. 4.42 – Estudo de rotações: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN.                                | 80 |
| Fig. 4.43 – Estudo de rotações, Patamar 50kN.  | 81 |
| Fig. 4.44 – Medições com LVDT: a) variação de tensão; b) conversão em deslocamentos.             | 82 |
| Fig. 4.45 – Estudo de deslocamentos: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN.                           | 83 |
| Fig. 4.46 – Estudo de deslocamentos: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN.                           | 83 |
| Fig. 4.47 – Estudo de deslocamentos, Patamar 50kN.   | 83 |
| Fig. 4.48 – Modelo de perfil metálico e malha de elementos finitos.                              | 84 |
| Fig. 4.49 – Deformada da viga e distribuição de deslocamentos.                                   | 85 |
| Fig. 4.50 – Localização dos elementos necessários à medição de extensões.                        | 85 |
| Fig. 4.51 – Distribuição de extensões na viga.   | 86 |
| Fig. 4.52 – Comparação de deslocamentos entre LVDT e modelo numérico.                            | 88 |
| Fig. 4.53 – Comparação de rotações entre inclinómetros e modelo numérico.                        | 88 |
| Fig. 4.54 – Análise do desvio relativo entre ERE8 e ERE13 e modelo numérico.                     | 89 |
| Fig. 5.1 – Instrumentação do demonstrador laboratorial.  | 94 |
| Fig. 5.2 – Sensores ópticos: a) esquema de colagem; b) aplicação em laboratório.                 | 94 |
| Fig. 5.3 – Instalação de extensómetro de fibra óptica.   | 95 |
| Fig. 5.4 – Ensaio Estático 6.  | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 5.5 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão. ....       | 96  |
| Fig. 5.6 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão. ....       | 97  |
| Fig. 5.7 – Medições com EFO: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão. ....        | 98  |
| Fig. 5.8 – Problemas: a) Fase de descarga; b) Disparidade nas extensões para a carga máxima. .... | 98  |
| Fig. 5.9 – Relações entre extensómetros: a) EFO1/EFO2; b) EFO1/EFO3; c) EFO2/EFO3. ....           | 100 |
| Fig. 5.10 – Medições com extensómetros da <i>Fiber Sensing</i> e extensómetro eléctrico. ....     | 101 |
| Fig. 5.11 – 1º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos. ....    | 102 |
| Fig. 5.12 – 2º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos. ....    | 102 |
| Fig. 5.13 – 3º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos. ....    | 102 |
| Fig. 5.14 – Desvios dos EFO: a) 1ºCiclo; b) 2ºCiclo; c) 3º Ciclo. ....                            | 103 |
| Fig. 5.15 – Ensaio Estático 7. ....   | 104 |
| Fig. 5.16 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão. ....      | 104 |
| Fig. 5.17 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão. ....      | 105 |
| Fig. 5.18 – Medições com EFO: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão. ....       | 105 |
| Fig. 5.19 – Problemas: a) Fase de descarga; b) Disparidade extensões para carga máxima. ....      | 106 |
| Fig. 5.20 – Relações entre extensómetros: a) EFO1/EFO2; b) EFO1/EFO3; c) EFO2/EFO3. ....          | 106 |
| Fig. 5.21 – Medições com extensómetros da <i>Fiber Sensing</i> e extensómetro eléctrico. ....     | 107 |
| Fig. 5.22 – 1º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos. ....    | 109 |
| Fig. 5.23 – 2º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos. ....    | 109 |
| Fig. 5.24 – 3º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos. ....    | 109 |
| Fig. 5.25 – Ensaio Estático 8. ....   | 110 |
| Fig. 5.26 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão. ....      | 110 |
| Fig. 5.27 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão. ....      | 111 |
| Fig. 5.28 – Medições com EFO: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão. ....       | 111 |
| Fig. 5.29 – Problemas: a) Disparidade de valores nos patamares; b) Fase de descarga. ....         | 112 |
| Fig. 5.30 – Relações entre extensómetros: a) EFO1/EFO2; b) EFO1/EFO3; c) EFO2/EFO3. ....          | 112 |
| Fig. 5.31 – Medições com extensómetros da <i>Fiber Sensing</i> e extensómetro eléctrico. ....     | 114 |
| Fig. 5.32 – Desvios dos sensores ópticos: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN. ....                  | 114 |
| Fig. 5.33 – Desvios dos sensores ópticos: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN. ....                  | 114 |
| Fig. 5.34 – Desvios dos sensores ópticos: Patamar 50kN. ....                                      | 115 |
| Fig. 5.35 – Resumo de extensões médias nos extensómetros ópticos e eléctrico. ....                | 116 |
| Fig. 6.1 – Localização da estação Parque da Maia na Rede da Metro do Porto. ....                  | 120 |
| Fig. 6.2 - Traçado do viaduto do Parque da Maia: a) rasante; b) em planta. ....                   | 121 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 6.3 – Secção transversal do viaduto no vão, em zona corrente (Sousa et al., 2006). .....       | 122 |
| Fig. 6.4 – Secção transversal do viaduto no vão na estação (Sousa et al., 2006). .....              | 123 |
| Fig. 6.5 – Pilares do viaduto (Sousa et al., 2006). .....   | 123 |
| Fig. 6.6 – Encontros do viaduto: a) Encontro Oeste; b) Encontro Este (Sousa et al., 2006). .....    | 124 |
| Fig. 6.7 – Fundações do viaduto: a) directas; b) indirectas (Sousa et al., 2006). .....             | 124 |
| Fig. 6.8 – Alinhamentos para designação dos sensores. ....  | 125 |
| Fig. 6.9 – Secções instrumentadas na Zona A. ....   | 126 |
| Fig. 6.10 – Secções instrumentadas na Zona B. ....  | 126 |
| Fig. 6.11 – Localização de sensores ao longo das secções instrumentadas. ....                       | 127 |
| Fig. 6.12 – Sistema de aquisição NI SCXI (Figueiredo, 2006). ....                                   | 128 |
| Fig. 6.13 – Colocação: a) Extensómetro e PT100; b) Caixa para os cabos (Sousa et al., 2006). ....   | 128 |
| Fig. 6.14 – a) Preparação da superfície; b) posicionamento; c) colagem (Sousa et al., 2006). .....  | 129 |
| Fig. 6.15 – Ligação dos extensómetros de embeber ao sistema de aquisição (Sousa et al., 2006). .... | 130 |
| Fig. 6.16 – Paragem no sentido N-S: a) longitudinal; b) transversal (Sousa et al., 2006). .....     | 131 |
| Fig. 6.17 – Paragem no sentido S-N: a) longitudinal; b) transversal (Sousa et al., 2006). .....     | 132 |
| Fig. 6.18 – Veículo tipo de duas composições (Sousa et al., 2006). .....                            | 132 |
| Fig. 6.19 – Extensões lidas com os sensores EC-S5-1C e EC-S5-1D. ....                               | 134 |
| Fig. 6.20 – Extensões lidas com os sensores EC-S6-1C e EC-S6-3C. ....                               | 135 |
| Fig. 6.21 – Extensões lidas com os sensores EB-S6-1E e EB-S6-3E. ....                               | 136 |
| Fig. 6.22 – Extensões lidas com os sensores EC-S6-1D e EC-S6-3D. ....                               | 136 |
| Fig. 6.23 – Resumo de extensões lidas: a) alinhamento 1; b) alinhamento 3. ....                     | 137 |
| Fig. 6.24 – Diagramas de extensões no alinhamento 3 da Secção S6 para paragem S-N. ....             | 137 |
| Fig. 6.25 – Extensões lidas com os sensores EC-S7-2A e EC-S7-2B. ....                               | 138 |
| Fig. 6.26 – Extensões lidas com os sensores EC-S7-1C (2) e EC-S7-1C (1). ....                       | 139 |
| Fig. 6.27 – Extensões lidas com os sensores EC-S7-3C (2) e EC-S7-3C (1). ....                       | 139 |
| Fig. 6.28 – Extensões lidas com os sensores EC-S7-1C (2) e EC-S7-3C (1). ....                       | 139 |
| Fig. 6.29 – Extensões lidas com o sensor EB-S7-3E. ....   | 140 |
| Fig. 6.30 – Diagrama de extensões na Secção S7 (alinhamento 3 paragem sentido S-N). ....            | 140 |
| Fig. 6.31 – Extensões lidas com os sensores EC-S8-1C e EC-S8-1D. ....                               | 141 |
| Fig. 6.32 – Extensões lidas com os sensores EC-S1-1C e EC-S1-1D. ....                               | 142 |
| Fig. 6.33 – Extensões lidas com os sensores EC-S2-3C e EC-S2-1C. ....                               | 143 |
| Fig. 6.34 – Extensões lidas com os sensores EB-S2-3E e EB-S2-1E. ....                               | 143 |
| Fig. 6.35 – Extensões lidas com o sensor EC-S2-3D. ....   | 143 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 6.36 – Extensões lidas com os sensores EC-S2-1C e EB-S2-1E. ....           | 144 |
| Fig. 6.37 – Extensões lidas com os sensores EC-S2-3C, EB-S2-3E e EC-S2-3D. .... | 144 |
| Fig. 6.38 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-1B e EC-S3-1A. ....           | 145 |
| Fig. 6.39 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-3B e EC-S3-3A. ....           | 145 |
| Fig. 6.40 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-3A e EC-S3-1A. ....           | 145 |
| Fig. 6.41 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-3B e EC-S3-1B. ....           | 146 |
| Fig. 6.42 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-1D e EC-S3-1C. ....           | 146 |
| Fig. 6.43 – Extensões lidas com o sensor EC-S3-1C. ....                         | 146 |
| Fig. 6.44 – Extensões lidas com os sensores EC-S4-1D e EC-S4-1C. ....           | 147 |

## INDICE DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 2.1 – Especificações técnicas de dois modelos de LVDTs (Cavadas, 2008).....                       | 8  |
| Quadro 2.2 - Especificações de inclinómetros eléctricos da série LSO da <i>Jewell Instruments</i> . .... | 9  |
| Quadro 2.3 – Especificações técnicas de RTD's (Félix, 2004).....   | 13 |
| Quadro 2.4 – Especificações técnicas de acelerómetros do tipo MEMS da <i>Analog Devices</i> . ....       | 16 |
| Quadro 2.5 – Especificações de extensómetros da <i>FiberSensing</i> . ....                               | 30 |
| Quadro 3.1 – Propriedades do perfil metálico HEB100. ....  | 36 |
| Quadro 3.2 – Especificações células de carga utilizadas.....   | 39 |
| Quadro 3.3 – Resumo dos procedimentos de calibração.....   | 42 |
| Quadro 3.4 – Constantes de calibração dos sensores utilizados.....                                       | 43 |
| Quadro 3.5 – Ensaio estáticos conduzidos em laboratório com sensores eléctricos.....                     | 48 |
| Quadro 3.6 – Ensaio estáticos conduzidos em laboratório com sensores em fibra óptica. ....               | 48 |
| Quadro 4.1 – Resumo das características da rede de extensómetros eléctricos. ....                        | 53 |
| Quadro 4.2 – Resumo módulos de elasticidade, Secção S1.....  | 57 |
| Quadro 4.3 – Extensões médias por patamar e sensor, Secção S1.....                                       | 61 |
| Quadro 4.4 – Valores de E nos diferentes ensaios estáticos. ....   | 62 |
| Quadro 4.5 – Resumo de extensões obtidas nos Extensómetros Eléctricos e desvios relativos. ....          | 65 |
| Quadro 4.6 – Resumo de rotações e desvios associados.....  | 72 |
| Quadro 4.7 – Valores médios para força de 50kN.....  | 72 |
| Quadro 4.8 – Resumo de deslocamentos e desvios associados. ....  | 75 |
| Quadro 4.9 – Extensões médias por patamar e sensor, Secção S1.....                                       | 78 |
| Quadro 4.10 – Resumo de desvios relativos ( $\Delta$ ) por patamar e sensor.....                         | 78 |
| Quadro 4.11 – Resumo de rotações e desvios associados.....   | 81 |
| Quadro 4.12 – Valores de rotações para valores exactos de força.....                                     | 81 |
| Quadro 4.13 – Resumo de deslocamentos e desvios associados. ....   | 82 |
| Quadro 4.14 – Deslocamentos e rotações obtidos no ANSYS.....   | 84 |
| Quadro 4.15 – Extensões obtidas no ANSYS.....  | 85 |
| Quadro 4.16 – Deslocamentos e rotações adquiridos e desvios em relação ao modelo.....                    | 86 |
| Quadro 4.17 – Resultados de extensões Ensaio 4.....  | 87 |
| Quadro 4.18 – Desvios relativos ( $\Delta$ ) de extensões entre Ensaio 4 e modelo. ....                  | 87 |
| Quadro 4.19 – Resultados de deslocamentos e rotações Ensaio 5.....                                       | 87 |
| Quadro 4.20 – Resultados de extensões Ensaio 5.....  | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 4.21 – Desvios relativos ( $\Delta$ ) de extensões entre Ensaio 5 e modelo.....             | 89  |
| Quadro 5.1 – Valores $\lambda_0$ e $S_\varepsilon$ .....   | 97  |
| Quadro 5.2 – Resumo de extensões nos extensómetros de fibra óptica. ....                           | 100 |
| Quadro 5.3 – Resumo de extensões nos extensómetros ópticos e eléctrico. ....                       | 103 |
| Quadro 5.4 – Resumo de extensões nos extensómetros de fibra óptica. ....                           | 107 |
| Quadro 5.5 – Resumo de extensões nos extensómetros ópticos e eléctrico. ....                       | 108 |
| Quadro 5.6 – Resumo de extensões nos extensómetros de fibra óptica. ....                           | 113 |
| Quadro 5.7 – Resumo de extensões nos extensómetros ópticos e eléctrico. ....                       | 115 |
| Quadro 5.8 – Desvios relativos entre sensores da <i>FiberSensing</i> . ....                        | 116 |
| Quadro 5.9 – Resultados de extensões do modelo e Ensaio 6 com desvios relativos ( $\Delta$ ).....  | 117 |
| Quadro 5.10 – Resultados de extensões do modelo e Ensaio 7 com desvios relativos ( $\Delta$ )..... | 117 |
| Quadro 5.11 – Resultados de extensões do modelo e Ensaio 8 com desvios relativos ( $\Delta$ )..... | 117 |
| Quadro 6.1 – Características gerais do veículo tipo de uma composição. ....                        | 132 |





# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Actualmente, a sociedade moderna depende de um conjunto complexo e extenso de infra-estruturas para manter a sua prosperidade económica e qualidade de vida. Durante décadas, as infra-estruturas de serviço público, como pontes e edifícios sofreram de negligência e usos descontrolados, o que, invariavelmente, levou a sua rápida deterioração. Consequentemente, actualmente está-se perante uma situação de crise estrutural global iminente, dado o conjunto de estruturas que necessitam ser reforçadas, reabilitadas ou substituídas ser vasto.

Em Portugal, foram muitos os factores que conduziram a uma má condição das obras de engenharia civil. A sua má inspecção e monitorização pode ser vista como um dos factores principais, uma vez que desta resultou a constatação tardia dos problemas existentes. De facto, as estruturas encontram-se num estado tal que o custo de reparação muitas vezes se aproxima do custo de substituição. Outros factores foram, por exemplo, os efeitos de corrosão em armaduras de estruturas de betão armado, corrosão de estruturas metálicas, aumento de requisitos estruturais ao longo do tempo e consequente aumento de cargas, entre outros. Por último, pode referir-se a simples deterioração por envelhecimento natural das estruturas. Uma vez que os Donos de Obra não podem substituir ou actualizar as suas obras recorrendo os mesmos materiais e métodos utilizados no passado, estes procuram novas tecnologias como os sistemas de monitorização estrutural, ferramentas que seguramente prolongarão o tempo de vida útil das estruturas e reduzirão os seus custos de manutenção.

Na realidade, pese embora os progressos relativamente recentes dos sistemas de monitorização estrutural, estes baseiam-se em conceitos já explorados há centenas de anos. No passado, a engenharia procurou examinar o desempenho das suas estruturas numa tentativa de prolongar a vida útil das mesmas e garantir que estas desempenhavam as suas funções sem questionar a segurança dos seus utentes. Contudo, apenas recentemente os sistemas de monitorização se tornaram numa parte essencial da formação em engenharia civil. De facto, nos últimos vinte anos, as tecnologias associadas à monitorização têm-se desenvolvido largamente, tornando esta numa área emergente associada à engenharia civil. A Civiónica é a designação dessa mesma área da engenharia, e esta emerge da aplicação da electrónica às estruturas. Por monitorização estrutural entende-se ter acesso à informação relativa ao comportamento em serviço das estruturas, usando para tal um conjunto variado de técnicas de medição. Conhecidas como estruturas inteligentes, estas apresentam um número elevado de sensores de diversos tipos, e assumem-se como uma solução possível ao diagnóstico da sua deterioração antes que esta se torne crítica. Assim, pode-se afirmar que os sistemas de monitorização estruturais representam ferramentas poderosas na procura de estruturas sustentáveis.

A rápida evolução das tecnologias associadas aos sistemas de monitorização de estruturas deve-se, por exemplo, à necessidade de monitorizar projectos com novas soluções arquitectónicas e novos materiais, de modo a garantir-se que mesmo tratando-se de sistemas estruturais não testados, a sua segurança não é comprometida. Outros motivos que auxiliaram o rápido desenvolvimento dos sistemas de monitorização de estruturas foram a necessidade de as monitorizar a longo prazo para uma melhor gestão das estruturas existentes, os progressos recentes em novos sensores funcionais e económicos, como os sensores de fibra óptica, os desenvolvimentos verificados nos sistemas de aquisição de sinal digital e na comunicação deste, e, por último, os avanços no processamento da informação obtida, incluindo, por exemplo, algoritmos de detecção de dano.

Neste trabalho pode-se definir sistema de monitorização como um método não destrutivo de avaliação *in situ* do comportamento estrutural. Para tal este método utiliza diferentes tipos de sensores instalados na estrutura, os quais são responsáveis por recolher informação continuamente ou periodicamente. Esta informação é posteriormente colectada, analisada e guardada para futuras análises, onde o objectivo principal é utilizar essa mesma informação para avaliar a segurança, a integridade e o comportamento da estrutura, e eventual dano que esta possa exibir. Os sistemas de monitorização de estruturas podem, assim, ser classificados em relação ao seu nível de complexidade, ou seja, pelo tipo de informação e conseqüente processo de decisão, que estes são capazes de fornecer. Estas classificações são particularmente instrutivas e úteis na compreensão dos objectivos de um sistema de monitorização estrutural, razão pela qual são desenvolvidas neste ponto introdutório à monitorização de estruturas. Sumariamente podem distinguir-se quatro níveis, conforme a Fig. 1.1 ilustra. O primeiro diz respeito ao nível básico de monitorização, onde o sistema é apenas capaz de detectar dano na estrutura, contudo não fornece qualquer informação relativa à sua natureza, localização ou severidade, isto é, o sistema não consegue avaliar a segurança da estrutura. O nível dois é ligeiramente mais sofisticado que o anterior na medida em que o sistema fornece informação sobre a localização do dano detectado. Quando o sistema de monitorização estrutural para além de detectar existência de dano na estrutura e a sua localização, fornece também informação sobre a gravidade do mesmo considera-se que se está perante um sistema de nível três. Por último, o sistema de monitorização mais avançado e complexo consegue fornecer informação detalhada sobre a presença, localização e severidade do dano causado na estrutura, ou seja, este é capaz de utilizar esta mesma informação para avaliar a segurança do sistema estrutural.

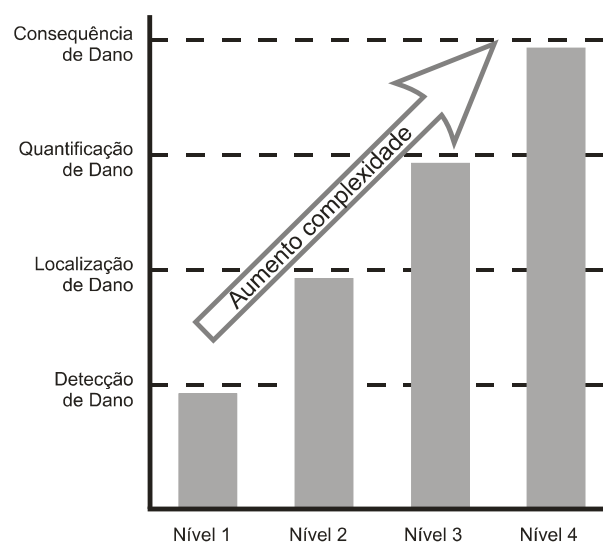


Fig. 1.1 – Classificação de sistemas por níveis de complexidade (Adaptado de Bisby, 2005).

## **1.2. OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A implementação de sistemas de instrumentação de longa duração, em termos da sua vida útil, ou de sistemas amovíveis, de fácil instalação em estruturas já construídas, origina a necessidade de desenvolver novos sensores, novas técnicas de instalação e novas técnicas de condicionamento e transmissão de sinais que permitam, de facto, conhecer o desempenho das estruturas em serviço e o seu estado. Desta forma consegue-se uma melhor prevenção de risco de dano, necessidade imperiosa na sociedade actual, mais exigente em termos de qualidade e de segurança.

A importância de monitorizar as estruturas de engenharia civil, em especial as infra-estruturas de transportes, tem suscitado um interesse crescente na utilização de equipamento eléctrico e electrónico na observação e controlo de obras. É justamente neste contexto de evolução, interacção e integração de áreas diferentes da Engenharia que se insere esta dissertação. Neste trabalho pretende-se analisar, aferir e comparar diferentes equipamentos de medição de grandezas estruturais e respectivos sistemas de monitorização, com base na montagem de um protótipo laboratorial e num caso de estudo de um viaduto do Metro do Porto.

Este documento desenvolve-se em sete capítulos, o primeiro dos quais é a presente introdução, onde se faz um enquadramento geral do tema a desenvolver e se apresentam os objectivos que são perseguidos.

Com base na experiência adquirida na aplicação de sistemas de monitorização em estruturas de engenharia civil, procede-se no Capítulo 2 à descrição geral destes sistemas. O objectivo deste capítulo é apresentar segundo uma óptica mais teórica e de uma forma clara e objectiva as características e potencialidades da monitorização estrutural, dando-se especial ênfase aos diferentes processos de medição, às diversas partes constituintes de um sistema de monitorização, às novas redes de sensores sem fios e de sensores ópticos, e, por último, à importância da monitorização nas diferentes fases de uma obra.

Realizado no seio da unidade de investigação LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito do projecto “Civiónica – Uma Área Interdisciplinar Emergente”, do programa “Iniciação à Investigação” da Universidade do Porto, neste trabalho constam diferentes aplicações de monitorização estrutural, quer em laboratório quer em ambiente de obra. É justamente na sequência dos diferentes ensaios conduzidos em laboratório que se apresenta o Capítulo 3, onde se resumem os procedimentos a realizar e se apresentam as características do demonstrador laboratorial a ensaiar. Neste apresentam-se os tipos de sensores utilizados, em função das suas potencialidades e dos objectivos que se pretendem atingir na dissertação. De facto, a importância da rede de sensores num sistema de monitorização é crucial e é justamente nessa óptica que se insere o Capítulo 4, onde se apresenta o funcionamento de sensores eléctricos clássicos, medidores de grandezas como extensões, rotações e flechas, e se avalia o seu desempenho recorrendo à sua comparação com valores teóricos obtidos da Resistência de Materiais e de um modelo numérico.

O desenvolvimento das redes de fibra óptica como solução à monitorização de estruturas convencional deve-se, sobretudo, aos avanços desta tecnologia e às inúmeras vantagens que a mesma oferece comparativamente com a instrumentação eléctrica. Assim, no Capítulo 5 debate-se esta questão e avalia-se a consistência de resultados de diferentes tipos de extensómetros de fibra óptica, comparando estes entre si e também com valores obtidos de extensómetros de resistência eléctrica e com um modelo numérico do demonstrador laboratorial. Pretende-se com esse estudo perceber se esses sensores podem ser considerados uma solução para futuros trabalhos desenvolvidos pelo LABEST.

Por último, no Capítulo 6 aborda-se como caso de estudo o acompanhamento do comportamento estrutural de um viaduto do Metro do Porto. Neste introduz-se o tema da monitorização e instrumentação de obras numa escala real, com adversidades e problemas diferentes, debatem-se técnicas de instalação de sensores e qualidade do sinal destes. O objectivo principal deste capítulo é o de comparar a informação obtida nos ensaios realizados com valores obtidos em campanhas de monitorização passadas e com um modelo numérico do viaduto, trabalhos anteriores desenvolvidos pelo LABEST.

Para terminar a presente dissertação inclui-se no Capítulo 7 a síntese do trabalho desenvolvido no subcapítulo referente às conclusões, e os desenvolvimentos futuros passíveis de serem realizados como seguimento do projecto que aqui se apresenta.

# 2

## SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

### 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com vista ao acompanhamento do comportamento de estruturas de engenharia civil durante as diferentes fases da vida destas, surge o conceito de monitorização. Este baseia-se na realização e interpretação de medições de diferentes grandezas estruturais, permitindo detectar anomalias e prever atempadamente eventuais situações de deterioração e colapso. Assim, a observação e o estudo do comportamento estrutural assumem particular importância em obras de maior dimensão, com sistemas estruturais complexos, e nas situações em que, da ocorrência de danos, possam resultar prejuízos severos. Pode então afirmar-se que o desenvolvimento e aplicação de sistemas de monitorização enquadram aspectos de natureza técnica, económica e social, relacionados com o comportamento e a segurança das estruturas (Félix, 2004).

A instalação de sistemas de monitorização é actualmente valorizada pelas entidades responsáveis pela exploração das obras, na medida em que fornecem dados essenciais aos modelos de decisão que permitem calendarizar e tipificar intervenções em estruturas existentes, possibilitando a sua reparação ou reabilitação, no caso de estas apresentarem sinais evidentes de deterioração e diminuição de desempenho do ponto de vista estrutural. Desta forma, os sistemas de monitorização são reconhecidos como ferramentas indispensáveis para incrementar a eficácia das respostas no âmbito do controlo de segurança das estruturas, cujos níveis de exigência são progressivamente acrescidos, permitindo, assim, melhorar as correspondentes condições de utilização e aumentar a respectiva longevidade (Hejll, 2007).

Por outro lado, o desenvolvimento a nível da modelação numérica de análise estrutural, evidenciado na capacidade actual de simular a não-linearidade do comportamento de diversos materiais, a evolução das suas características mecânicas e, comportamento reológico, entre outros, implica a definição de um vasto número de parâmetros, os quais podem ser obtidos recorrendo a análise experimental. Uma vez que a monitorização estrutural fornece um conjunto ímpar de valores por longos períodos de tempo, aquela assume um papel fundamental na calibração e aferição dos respectivos modelos numéricos.

Deste modo, para que os novos sistemas de monitorização venham a registar níveis crescentes de adopção pelos diferentes intervenientes no sector da construção civil e obras públicas, importa fundamentalmente perceber que diferentes grandezas estruturais se torna relevante medir e as melhores formas de o fazer, bem como conceber sistemas eficientes de aquisição, processamento e

tratamento dos dados necessários, com vista a extrair unicamente a informação essencial ao estudo das condições das estruturas monitorizadas.

É, assim, objectivo deste capítulo, apresentar sumariamente as características e potencialidades dos sistemas de monitorização de estruturas. Dada a complexidade e abrangência do tema, transversal a diversas áreas de conhecimento, optou-se por efectuar uma abordagem mais genérica direccionada para os sistemas de monitorização aplicados nas estruturas de engenharia civil, realçando e desenvolvendo os aspectos considerados mais relevantes, alguns dos quais objecto de estudo em capítulos subsequentes.

## **2.2. MEDIÇÕES DE GRANDEZAS ESTRUTURAIS**

### **2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Conforme referido no ponto anterior, um sistema de monitorização baseia-se na realização e interpretação de medições de diferentes grandezas estruturais, permitindo detectar anomalias e prever atempadamente eventuais situações de deterioração e colapso (Worden et al., 2007).

O processo de medição constitui, assim, a base de um sistema de monitorização estrutural, pelo que se torna relevante efectuar uma adequada selecção do método e dos instrumentos de medição a utilizar, bem como interpretar correctamente os valores obtidos.

Na observação de estruturas podem distinguir-se grandezas caracterizadoras do seu comportamento global e local. São exemplos do primeiro grupo, deslocamentos, flechas, rotações, reacções de apoio e aberturas de juntas de dilatação, enquanto, medição de tensões, extensões e abertura de fendas, se relacionam com o segundo. Existem ainda outros tipos de grandezas usualmente medidas em obra, nomeadamente as que dizem respeito à caracterização da durabilidade da estrutura e das condições ambientais. São exemplos destas, respectivamente, a corrosão das armaduras e a temperatura ambiente. O estudo desta última assume particular importância uma vez que a acção térmica introduz variações de estado de deformação e tensão nos elementos estruturais e também afecta as características do próprio sistema de medição. Devem, por isso, ser instalados termómetros em número suficiente, sobretudo nas secções instrumentadas (Michaels et al., 2009).

Apresentam-se em seguida os processos de medição de grandezas que mais correntemente têm sido utilizados na observação do comportamento estrutural, alguns dos quais são objecto de aplicação no modelo laboratorial e no caso de obra a estudar no âmbito da presente dissertação.

### **2.2.2. MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS**

Os instrumentos mais utilizados, destinados à medição de deslocamentos entre dois pontos, são os transdutores capacitivos, resistivos e indutivos. Neste trabalho apresentam-se os transdutores indutivos do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), Fig. 2.1, uma vez que nos casos de estudo a analisar foi essa a solução adoptada para medição de flechas.



Fig. 2.1 – LVDT to tipo ACT da marca RDP.

### Transdutor Indutivo LVDT

O deslocamento é obtido num LVDT de forma indirecta, através da criação de uma corrente induzida pelo deslocamento de um núcleo magnético no interior do transdutor. A estrutura básica deste aparelho é constituída por um núcleo de material permeável e três enrolamentos, dos quais um é designado por primário e os outros dois por secundários, Fig. 2.2a). O enrolamento primário é alimentado por uma corrente alternada AC,  $v_i(t)$ , que gera um campo magnético, enquanto os enrolamentos secundários estão colocados em série e em oposição, para que as tensões induzidas pelo acoplamento de fluxo com o primário,  $v_1(t)$  e  $v_2(t)$ , estejam desfasadas. Deste modo, a tensão de saída,  $v_0(t)$ , é dada pela diferença entre as tensões induzidas entre estes:

$$v_0(t) = v_1(t) - v_2(t) \quad (2.1)$$

A posição do núcleo móvel determina a ligação magnética entre o enrolamento primário e cada um dos enrolamentos secundários, o que significa que, quando o núcleo móvel se encontra na posição intermédia, a tensão induzida nos dois enrolamentos secundários é igual, logo a diferença de tensão é nula, e quando este é deslocado, a variação no acoplamento de fluxo faz aumentar a tensão num secundário e diminuir no outro. Tal como se pode observar na Fig. 2.2b), a amplitude do sinal de saída,  $v_0$ , é uma função linear da posição do núcleo, o que implica uma boa linearidade dentro do campo de medida do LVDT.

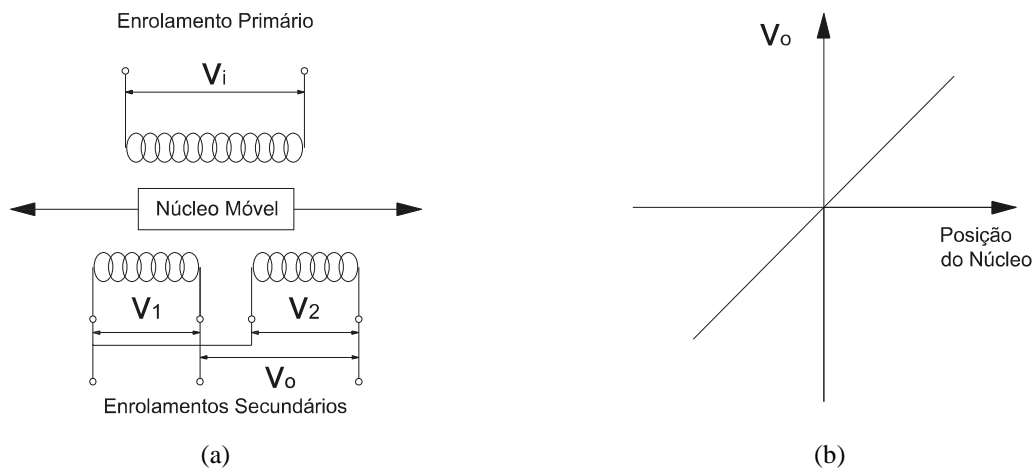


Fig. 2.2 – Esquema de LVDT: a) circuito eléctrico; b) curva característica (Figueiredo, 2006).

A sua aplicação ao longo dos anos permite afirmar que estes transdutores apresentam elevada repetibilidade, boa estabilidade a longo prazo, grande sensibilidade e boa resposta, tanto a leituras dinâmicas como estáticas, com campos de medida de deslocamento que variam entre  $\pm 1\text{mm}$  e  $\pm 0,5\text{m}$ .

Por outro lado, são sensores onde os efeitos da temperatura não são auto-compensados, contudo a sua influência no resultado final é bastante reduzida.

Conforme referido anteriormente estes dispositivos electromecânicos permitem medir deslocamentos ou movimentos relativos, daí serem utilizados para controlo de flechas, abertura de juntas ou rotações de apoios. Por fim, no Quadro 2.1 inclui-se o resumo das características técnicas de LVDTs correntes.

Quadro 2.1 – Especificações técnicas de dois modelos de LVDTs (Cavadas, 2008).

| Modelo          | Gama de Medição [mm] | Erro de Não Linearidade [%FS] | Tensão de Excitação [V] | Sinal de Saída [mA] | Gama de Temperatura [°C] |
|-----------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|
| RDP             | -25 – 25             | 0,25                          | 12 – 36                 | 4 – 20              | -10 – 70                 |
| <i>Monitran</i> | -25 – 25             | 0,50                          | 14 – 24                 | 4 – 20              | 0 – 70                   |

### 2.2.3. MEDIÇÃO DE ROTAÇÃO

Existem dois processos distintos para a medição da rotação na observação de estruturas. O primeiro baseia-se na medição da variação angular de um dado eixo, entre uma posição inicial e uma posição final, enquanto o segundo processo mede o desvio angular de um dado eixo em relação a um plano de referência fixo. Assim, no primeiro caso, recorrendo a clinómetros, obtêm-se rotações relativas e, no segundo, através de inclinómetros, inclinações absolutas. Alternativamente pode ainda medir-se a rotação relativa de um dado segmento medindo-se as distâncias entre dois pares de pontos com a utilização de transdutores de deslocamento, como os que foram já apresentados neste trabalho.

Os clinómetros foram os primeiros a surgir no mercado, destacando-se o clinómetro de bolha de ar, contudo, mesmo com maior precisão e uma grande tradição e experiência na sua utilização, estes têm vindo a ser preteridos relativamente aos inclinómetros eléctricos para monitorização de estruturas de engenharia civil. Tal deve-se ao inconveniente dos primeiros necessitarem da deslocação de um técnico ao local sempre que se pretenda proceder a uma medição, e também pelo desenvolvimento que tem ocorrido nos segundos, nomeadamente a nível de automatização das leituras, possibilitando frequências de aquisição mais elevadas.

#### ***Inclinómetros Eléctricos***

Conforme referido anteriormente a principal vantagem destes sensores reside no facto de poderem ser integrados em sistemas de aquisição automáticos. Não existe um princípio de funcionamento comum para estes sensores, uma vez que cada fabricante desenvolve o seu próprio sistema e este por vezes não é explicitamente divulgado.

A Fig. 2.3 apresenta um inclinómetro eléctrico da *Jewell Instruments* que permite medir inclinações numa dada direcção até  $\pm 1^\circ$ . Esta questão é particularmente importante na medida em que estes sensores lêem desvios angulares de um dado eixo em relação a um plano de referência, o que implica uma instalação cuidada de modo a que o campo de medida não seja ultrapassado durante os eventos a observar. Outras especificações técnicas podem ser consultadas no Quadro 2.2.



Fig. 2.3 – Inclinómetro eléctrico da série LSO da *Jewell Instruments* .

O funcionamento deste sensor assenta na medição do movimento imposto a um pêndulo gravítico que se desloca num meio viscoso no núcleo deste. Quando o inclinómetro está na posição horizontal, o magneto de ferro do pêndulo encontra-se a igual distância de duas bobinas que o ladeiam, contudo, impondo uma rotação em relação à horizontal, a distância entre uma das bobinas e o magneto reduz-se. Assim, a indutância de uma bobina aumenta enquanto a outra diminui, o que, com recurso a um circuito electrónico, é convertido num sinal de saída em corrente contínua linear em relação ao ângulo que o inclinómetro forma com a horizontal.

Deve referir-se que este núcleo do sensor é suficientemente robusto para resistir a eventuais choques e vibrações e manter a precisão e fiabilidade adequadas, enquanto a protecção externa do sensor permite a sua utilização em ambientes climatéricos adversos. Não obstante, deve garantir-se ainda a protecção dos mesmos com recurso a caixas de plástico perfeitamente estanques após a sua aplicação à estrutura.

Quadro 2.2 - Especificações de inclinómetros eléctricos da série LSO da *Jewell Instruments*.

| Nº de Eixos de Medida | Gama de Medição [°] | Erro de Não Linearidade [%·FS] | Tensão de Excitação [V] | Sinal de Saída [mA] | Gama de Temperatura [°C] |
|-----------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|
| 1                     | -1 – 1              | 0,05                           | 24                      | 4 – 20              | -18 – 71                 |
| 1                     | -3 – 3              | 0,05                           | 24                      | 4 – 20              | -18 – 71                 |
| 1                     | -14,5 – 14,5        | 0,02                           | 24                      | 4 – 20              | -18 – 71                 |

#### 2.2.4. MEDIÇÃO DE EXTENSÕES

Os instrumentos destinados a medição pontual da extensão são designados extensómetros. Estes podem ser de aplicação à superfície de elementos estruturais ou de embeber, sendo os primeiros particularmente indicados para estruturas de madeira, de alvenaria, metálicas ou ainda estruturas de betão existentes, enquanto os segundos se destinam a medição de extensões em estruturas de betão, necessitando contudo de ser instalados previamente à betonagem das mesmas.

Actualmente os medidores de extensões mais usados na monitorização de estruturas de engenharia civil são os extensómetros de resistência eléctrica e os de fibra óptica (ver Fig. 2.4), sendo os primeiros mais económicos e mais largamente usados. Contudo, para elevadas distâncias entre estes equipamentos de medição e os sistemas de aquisição de dados, o facto de os extensómetros de resistência eléctrica possuírem um baixo nível de tensão, torna-os susceptíveis à introdução de ruído nos sinais, resultante de interferências electromagnéticas ou electrostáticas. Os extensómetros de resistência eléctrica são ainda preteridos no caso de medições dinâmicas, onde os filtros usados para

eliminar o ruído podem alterar as características do sinal original. Nestes casos os extensómetros de fibra óptica assumem-se como uma solução mais eficaz, uma vez que produzem sinais em forma de luz, totalmente imunes às interferências anteriormente citadas, embora sejam ainda uma solução pouco económica.

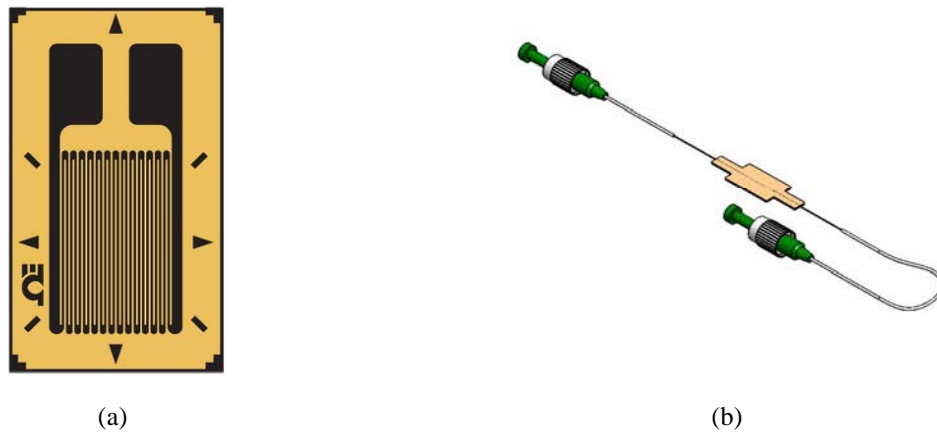


Fig. 2.4 – Extensómetros: a) de resistência eléctrica da *Omega*; b) de fibra óptica da *FiberSensing*.

Pese embora existirem outros tipos de sensores destinados à medição de extensões, como os extensómetros de cordas vibrantes ou mesmo transdutores de deslocamento, o facto de não serem objecto de aplicação em capítulos subsequentes desta dissertação faz com que se detalhem os extensómetros de resistência eléctrica, dada a maior experiência na sua utilização. Remete-se a análise dos sensores de fibra óptica para o subcapítulo 2.5.

### ***Extensómetros de Resistência Eléctrica***

Este tipo de extensómetros foi desenvolvido e fundamentado na teoria da ponte de *Wheatstone* (Desai, 2007). Nesta, um diferencial de potência entre quatro resistências eléctricas é medido e posteriormente correlacionado com as extensões, i.e., o seu princípio de funcionamento assenta na variação de resistência  $R$  de um condutor eléctrico de comprimento  $L$  quando sujeito a uma deformação mecânica, que será proporcional à extensão  $\varepsilon$ . A relação de proporcionalidade entre a variação de resistência eléctrica e a extensão é dada pelo factor de ganho do extensómetro,  $G$ .

$$\frac{dR}{R} = G \cdot \frac{dL}{L} \quad (2.2)$$

A expressão (2.2) pode ainda tomar o seguinte aspecto:

$$x = G \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

em que,  $x$  representa a variação de resistência do extensómetro a partir de um determinado valor de referência.

Foi referido que os extensómetros podem ser de aplicação à superfície por colagem ou de embeber. De forma a introduzir os conceitos básicos de funcionamento destes aparelhos, descrevem-se os de colagem, uma vez que o princípio de funcionamento dos de embeber no betão é em tudo semelhante. Refere-se unicamente que os extensómetros de embeber apresentam vantagens na medição de extensões neste tipo de estruturas, uma vez que possuem protecção contra humidade e corrosão, são facilmente instalados em obra e medem extensões em zonas mais representativas do betão. Deste último facto resulta o seu maior comprimento, uma vez que é necessário que a extensão obtida seja a

média das extensões lidas do material heterogéneo, e não extensões localizadas devido a descontinuidades no interior da massa de betão.

Os extensómetros de colar são constituídos por uma malha de filamentos de aproximadamente 0,025mm de espessura, a resistência, colada directamente a uma superfície através de uma película de pequena espessura, a base, geralmente de resina *epoxy*. A Fig. 2.5 representa o esquema geral de um destes sensores, bem como a sua aplicação.

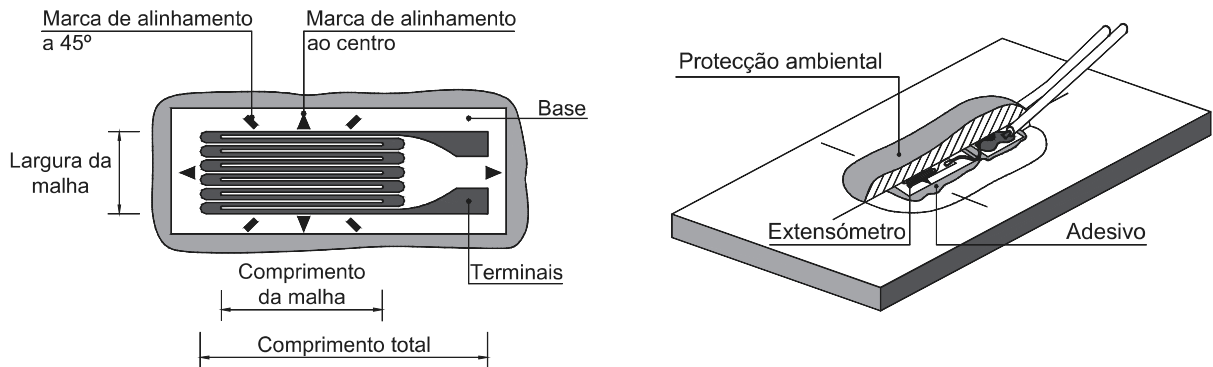


Fig. 2.5 – Extensómetro de resistência eléctrica (Félix, 2004).

Os extensómetros de resistência eléctrica apresentam nas extremidades da malha de filamentos dois terminais que permitem a sua ligação aos condutores do circuito eléctrico, que, por sua vez, estabelecem a ligação do sensor ao sistema de aquisição. Sempre que é aplicada uma deformação na superfície, a deformação desta é comunicada à resistência, induzindo uma variação da resistência eléctrica do filamento que é correlacionada com uma extensão, a qual varia linearmente com a resistência eléctrica. Esta variação de resistência, num extensómetro de colar ideal, deveria dever-se unicamente às deformações sofridas pela superfície do elemento onde o sensor está aplicado. Porém, as propriedades do adesivo que cola o sensor à superfície da estrutura e a estabilidade do condutor, normalmente materializado por uma malha de liga metálica, afectam a leitura da deformação real experimentada pela superfície da estrutura.

Neste processo, a base funciona tanto como elemento de compatibilização de deformações entre a superfície e a malha de filamentos, como isola electricamente esta da superfície, contudo, esta é especialmente sensível à fluência, à degradação da cola e à influência da temperatura. De facto, na escolha do tipo de extensómetro, para além das características do sensor, é importante ter em conta a sua estabilidade no tempo e a sua sensibilidade à temperatura, uma vez que a liga do material constituinte do mesmo tende a variar o valor da resistência com o envelhecimento, e é sensível a alterações de temperatura. Apesar de em medições de curta duração este facto não ser um problema, para leituras continuadas, em longos planos de monitorização, deverão ser previstas correcções às leituras para compensar a componente das variações térmicas nos extensómetros.

### ***Extensómetros Auto-Compensados para o Efeito da Temperatura***

A sensibilidade dos extensómetros de aplicação à superfície relativamente à variação da temperatura deve-se fundamentalmente à variação da resistividade eléctrica da malha do extensómetro, e ao facto dos coeficientes de dilatação térmica da liga que constitui essa mesma malha e do material ao qual o sensor está aplicado serem distintos.

É usual referir-se como “extensão aparente” a alteração na resistência do extensómetro que não é causada por uma deformação mecânica do elemento instrumentado. Assim, com vista a evitar esta

deformação térmica e minimizar os seus efeitos procura-se que os coeficientes de dilatação térmica referidos,  $\alpha_{\text{mat}}$  e  $\alpha_{\text{ext}}$ , sejam idênticos, visto que a extensão,  $\varepsilon$ , devido ao efeito da temperatura,  $\Delta T$ , medida por um extensómetro auto-compensado, é directamente proporcional à diferença dos seus valores.

$$\varepsilon = (\alpha_{\text{mat}} - \alpha_{\text{ext}}) \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Existem ainda curvas de comportamento fornecidas pelos fabricantes de extensómetros que possibilitam o ajuste directo das extensões devidas ao efeito da temperatura, sendo que para tal é necessário medir junto de cada sensor a temperatura a que este está sujeito, o material utilizado no seu fabrico, o material sobre o qual está aplicado, a sensibilidade transversal do extensómetro, entre outros factores. É usual os extensómetros serem auto-compensados para determinadas gamas de temperatura, por exemplo dos 20°C aos 25°C, contudo, fora desta gama os extensómetros exibem um sinal que está associado à já mencionada “extensão aparente”. Nestes casos, a extensão indicada é igual à soma da parcela da extensão induzida na superfície do elemento devido às acções, com a parcela da extensão devido à acção da temperatura no sensor, o que implica que a correcção deste efeito é simplesmente realizada através da subtracção da “extensão aparente”, fornecida pela curva de comportamento respectiva.

Por fim, pode ser referido o método de compensação do efeito de temperatura recorrendo a um segundo extensómetro por cada sensor activo, designado extensómetro compensador de temperatura. Embora seja um procedimento de elevada eficácia, possui também alguns inconvenientes, nomeadamente o facto de duplicar o número de extensómetros nos pontos de medição e de as suas regras de instalação serem minuciosas.

#### 2.2.5. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Com vista à medição de temperatura existe actualmente uma grande variedade de instrumentos cada um dos quais detentores de características, como o campo de medição e linearidade, que os tornam indicados para aplicações específicas. Actualmente, os sensores de temperatura mais utilizados são os detectores resistivos e os termopares.

##### ***Detector de Temperatura Resistivo RTD***

Um detector de temperatura resistivo, RTD, do inglês *Resistance Temperature Detector*, é um sensor cujo princípio de funcionamento se baseia no aumento da resistência do metal com a temperatura. O metal mais usado neste tipo de sensores é a platina, originando os designados sensores PRT, *Platinum Resistance Thermometer*, embora existam outros metais como o cobre ou o níquel que também podem ser utilizados.

Como se pode constatar pela expressão (2.5), a resistência do metal varia linearmente com a temperatura, dentro das gamas que usualmente se pretendem medir. Na expressão,  $R_T$  indica a resistência do condutor à temperatura  $T$ , enquanto  $R_0$  a resistência do mesmo condutor à temperatura 0°C e  $\alpha$  uma constante típica do condutor que expressa a sensibilidade do mesmo.

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad (2.5)$$

A resistividade eléctrica,  $\rho$ , é um parâmetro muito importante na definição do condutor. Esta deve ser elevada para que o sensor tenha um elevado valor óhmico, permitindo a utilização de fios de ligação ao equipamento de aquisição mais compridos, e, geralmente, sensores de massa reduzida, que

permitem tempos de resposta mais curtos. No Quadro 2.3 apresentam-se algumas características dos condutores mais utilizados nos sensores de temperatura resistivos. Neste quadro verifica-se que a platina apresenta o valor mais elevado de resistividade, e mesmo com uma sensibilidade mais baixa quando comparada com os outros condutores, o facto de esta apresentar uma gama de medição mais abrangente faz com que este material seja preferido.

Quadro 2.3 – Especificações técnicas de RTDs (Félix, 2004).

| Parâmetro                     | Unidades                       | Platina                      | Cobre      | Níquel       |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------|--------------|
| $\rho$ (a 20°C)               | $\mu\Omega \times \text{cm}$   | 10,6                         | 1,673      | 6,844        |
| $\alpha$ ( $\times 10^{-3}$ ) | $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ | 3,85                         | 4,30       | 6,81         |
| $R_0$                         | $\Omega$                       | 50, 100, 200, 500, 1000, ... | 10 (20°C)  | 50, 100, 120 |
| Gama de Medição               | $^\circ\text{C}$               | -200 – 850                   | -200 – 260 | -80 – 320    |

Deste modo, o sensor mais utilizado em monitorização de estruturas utiliza como condutor a platina. Com uma resistência a 0°C de 100 $\Omega$ , este é designado por PT100, Fig. 2.6. Regra geral, estes sensores são encapsulados com troços de tubo de cobre ou aço inox, promovendo, por um lado, uma protecção adicional do sensor e, por outro lado, o encurtamento do tempo de resposta dada a sua elevada condutibilidade térmica face a outros materiais. No caso de o elemento sensor ser de película fina, construído pela deposição em vazio de platina sobre um substrato cerâmico de modo a formar um elemento resistivo estável, as suas principais vantagens residem nas reduzidas dimensões, rápida resposta térmica e construção simples.

Relativamente à sua aplicação em obra, deve-se procurar não expor os sensores de temperatura à radiação solar e adoptar os procedimentos necessários de forma a evitar a afectação da temperatura. Assim, o contacto entre sensores utilizados para medição da temperatura ambiente e das temperaturas na estrutura, deve ser evitado e, por outro lado, estes últimos deverão estar protegidos, recorrendo, por exemplo, a placas de isolamento térmico.



(a)



(b)

Fig. 2.6 – Sensor de temperatura PT100: a) encapsulado; b) película fina da *PicoTechnology*.

### 2.2.6. MEDIÇÃO DE ACELERAÇÃO

Os acelerómetros são sensores bastante utilizados na monitorização estrutural para medir acelerações. Dentro destes existem vários tipos de acelerómetros que diferem no seu funcionamento interno, tais como os piezoeléctricos e os capacitivos. Neste trabalho descrevem-se de uma forma geral estes dois tipos de sensores, vulgarmente utilizados em obras de arte, e introduz-se também um novo tipo de acelerómetros capacitivos, os *MicroElectroMechanical Systems* (MEMS).

#### *Acelerómetros Piezoeléctricos*

Estes acelerómetros são compostos por elementos piezoeléctricos associados com uma massa e ligados na base a uma caixa de protecção. Quando a base da caixa de protecção é sujeita a movimentos, a massa  $m$  exerce uma força de inércia sobre o elemento de cristal piezoeléctrico, produzindo uma alteração eléctrica no cristal proporcional à força. Dentro da gama de frequências do acelerómetro, verifica-se então proporcionalidade entre a alteração eléctrica e a força de inércia e também entre esta e a aceleração  $a$  que a massa  $m$  está sujeita, conforme enuncia a segunda lei de Newton (2.6).

$$F=m \cdot a \quad (2.6)$$

Este tipo de sensores oferece ainda elevados campos de medida e gamas de frequência a um custo razoável, contudo este é fortemente influenciado pelos materiais piezoeléctricos utilizados. As soluções habituais passam por cristais, cerâmicas, polímeros ou compósitos de polímeros e cerâmica, capazes de combinar as vantagens de ambos, a preços moderados. A Fig. 2.7 apresenta o princípio de funcionamento destes sensores, bem como o aspecto destes.

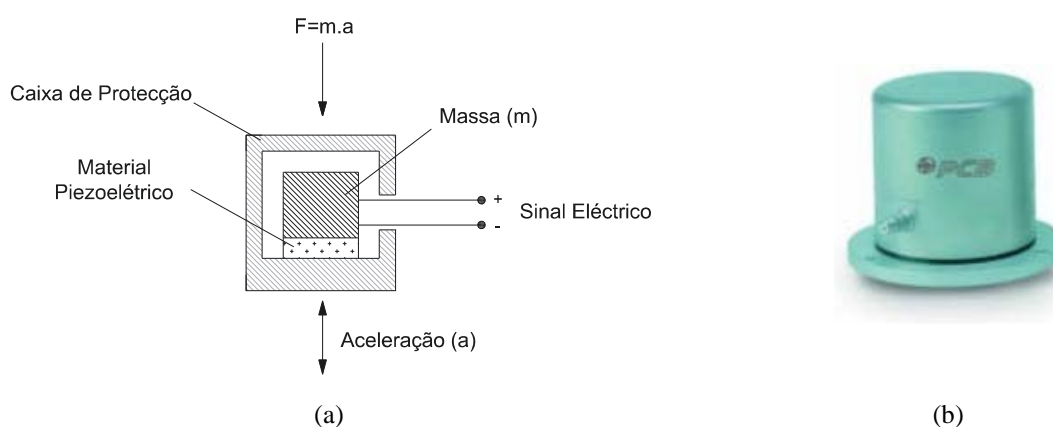


Fig. 2.7 – Piezoeléctrico: a) esquema de funcionamento; b) modelo da PCB (Figueiredo, 2006).

#### *Acelerómetros Capacitivos*

Os acelerómetros capacitivos medem acelerações através da leitura das alterações em condensadores eléctricos. O elemento sensor consiste em duas placas condensadoras paralelas actuando em modo diferencial e operando num circuito de ponte. Por intermédio destas placas fixas, na presença de acelerações, um oscilador movimenta-se criando um diferencial entre estas, dadas as distâncias entre estas e o corpo móvel não serem iguais, Fig. 2.8. Assim, a tensão de pico gerada é processada e constitui o sinal de saída obtido.

Estes acelerómetros operam tipicamente para baixas gamas de frequência, contudo o seu baixo custo torna-os atractivos para incorporar redes de sensores.

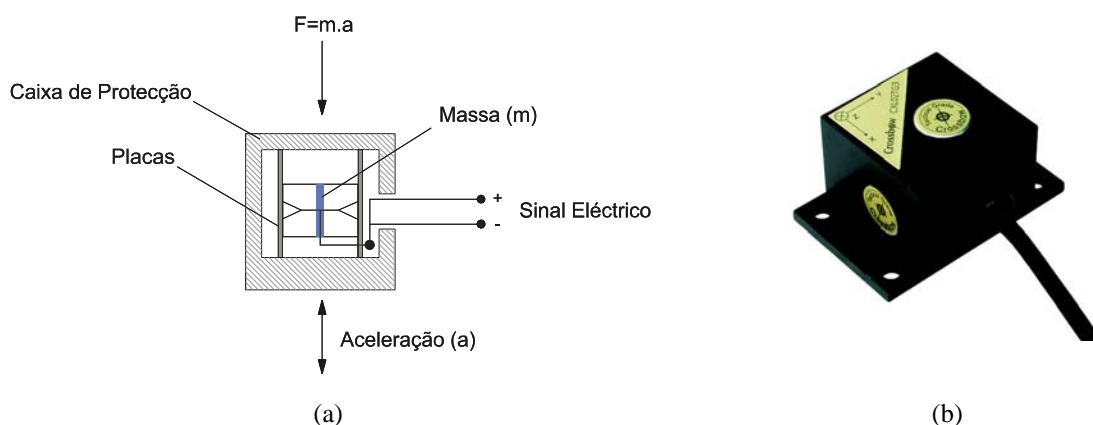


Fig. 2.8 – Acelerómetro capacitivo: a) esquema de funcionamento; b) modelo da Crossbow.

### ***Acelerómetros do tipo MEMS***

Da designação inglesa *MicroElectroMechanical Systems*, os MEMS representam hoje todo o tipo de dispositivos microscópicos com funções mecânicas. Os MEMS assumem-se, assim, como a junção entre a electrónica à escala micro com a tecnologia de maquinaria igualmente à escala micro. Esta tecnologia está presente em diversas áreas e o seu número de aplicações é actualmente vasto, dadas as vantagens que apresenta. Trata-se de uma tecnologia de uma escala menor, mais rápida e mais barata.

Os componentes que integram estes sistemas podem apresentar dimensões entre 0,001mm e 0,1mm, enquanto os sensores por si formados variam entre 0,02mm e 1mm. Estes últimos são constituídos por uma unidade central de processamento de dados, um microprocessador e micro sensores capazes de interagir com o exterior. Esta é a principal característica destes sistemas que num único chip incluem sensor e condicionamento de sinal, Fig. 2.9.

Nestes sistemas existe grande variedade de materiais e técnicas de produção, dependendo a sua escolha do aparelho que se pretende desenvolver e do sector no qual este será aplicado. Actualmente, os sensores tipo MEMS são cruciais na electrónica automóvel, tendo iniciado a sua aplicação neste sector no âmbito da realização de testes de colisão. São igualmente aplicados em equipamento médico, equipamentos electrónicos portáteis, como telemóveis ou PDAs e, aparelhos informáticos periféricos, entre outros (Hsu, 2006).

Este tipo de sensores utiliza como material o silicone e o seu meio de produção baseia-se na deposição de sucessivas camadas, seguido de processos de fotolitografia e de remoção selectiva de partes do condutor de silicone, ou seja, o processo é em tudo semelhante ao de produção de circuitos integrados, o que à partida indicia elevados índices de funcionalidade e fiabilidade a preços relativamente baixos (Cacchione, 2007). De facto, a expansão da utilização da micro electrónica à base de silicone revela vantagens a nível do futuro valor desta, visto ser um material de fácil obtenção, elevada qualidade e baixo custo. Por outro lado, exhibe comportamento perfeitamente elástico quando submetido a esforços e uma resistência à fadiga capaz de suportar um número elevadíssimo de ciclos em condições de serviço.

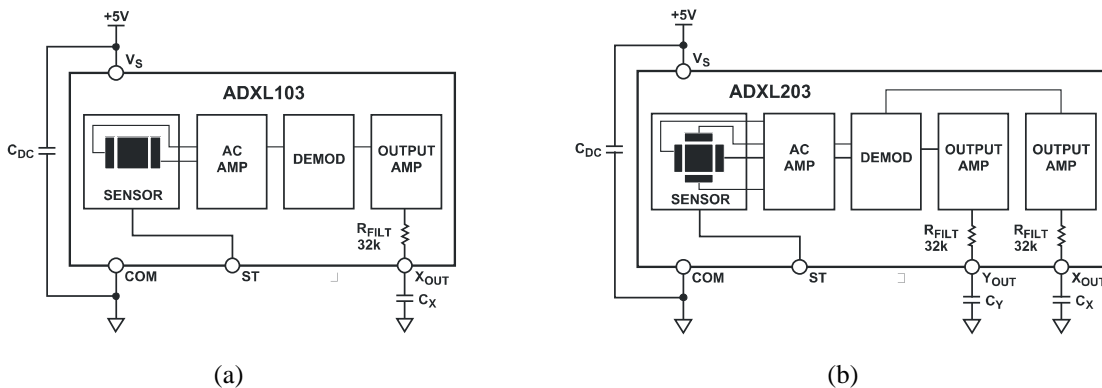


Fig. 2.9 – Esquema de ligação do sensor tipo MEMS: a) de um eixo; b) de dois eixos.

Existem duas grandes técnicas relativas à formação de MEMS, a *Surface Micromachining* e a *Bulk Micromachining* (Bradley, 2001), sendo a primeira adoptada no processo de formação dos sensores utilizados em algumas das aplicações a estudar na presente dissertação. Nesta técnica depositam-se camadas de materiais essenciais à formação do sensor, como também outras que serão sacrificadas numa fase posterior de modo a definirem-se espaços entre as anteriores. Assim, segundo o princípio de transdutores capacitivos já enunciado anteriormente, facilmente se converte o sinal mecânico recebido num equivalente eléctrico.

Os acelerómetros do tipo MEMS utilizados, da *Analog Devices* (ver Fig. 2.10), fazem parte da gama de acelerómetros de campo de medição baixo, ou seja para valores de acelerações de aproximadamente  $\pm 2g$ . Estes acelerómetros apresentam alta precisão, baixa tensão de excitação, dois ou três eixos de medição de acelerações e ajuste de frequência de aquisição consoante a sua aplicação. Para culminar são ainda sensores de dimensões reduzidas e bastante económicos.

No Quadro 2.4, indicam-se algumas especificações técnicas e características de dois acelerómetros do tipo MEMS.

Quadro 2.4 – Especificações técnicas de acelerómetros do tipo MEMS da *Analog Devices*.

| Modelo  | Nº de Eixos de Medida | Gama de Medição [g] | Tensão de Excitação [V] | Frequência de Aquisição [kHz] | Gama de Temp. [°C] | Dimensões [mm] |
|---------|-----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------|
| ADXL203 | 2                     | -1,7 – 1,7          | 3,0 – 6,0               | 2,5                           | -40 – 125          | 5x5x2          |
| ADXL330 | 3                     | -3 – 3              | 2,0 – 3,6               | 1,6 (0,55 eixo z)             | -25 – 70           | 4x4x1,45       |



Fig. 2.10 – Acelerómetro do tipo MEMS, modelo ADXL330, da *Analog Devices*.

## 2.3. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

### 2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Um sistema de monitorização estrutural tem como principal objectivo fornecer informação, a mais pormenorizada possível, que caracterize o comportamento de uma determinada estrutura e permita detectar eventuais danos que na mesma possam existir. Claramente, o desenvolvimento de tais sistemas envolve o conhecimento e *know-how* de disciplinas variadas, como Estruturas, Materiais, Informática, Electrónica, entre outras (Bisby et al., 2005). Todavia, muitas vezes a análise estrutural e a identificação de problemas é complexa e difícil, na medida em que existem muitos parâmetros difíceis de quantificar correctamente, alguns dos quais foram já abordados no tópico anterior. Assim, é objectivo deste subcapítulo apresentar as diversas partes constituintes de um sistema de monitorização e expor os conhecimentos teóricos necessários para entender o seu funcionamento.

Os elementos constituintes de sistemas de monitorização de estruturas de engenharia civil podem ser agrupados em subsistemas de modo a facilitar a compreensão do funcionamento de todo o processo de monitorização. Assim, de acordo com as orientações da ISIS Canada de 2001, neste trabalho opta-se por dividir um sistema de monitorização em rede de sensores, sistema de aquisição de dados, sistema de comunicação de dados, processamento e armazenamento de dados, tratamento de dados e, por último, avaliação do comportamento estrutural. Apresenta-se na Fig. 2.11 o esquema geral de um sistema de monitorização com as diferentes etapas do processo e suas principais finalidades.

O projecto de um sistema de monitorização e a metodologia a adoptar neste depende directamente da aplicação de engenharia civil em questão. Assim, é importante perceber numa primeira fase cada componente e a sua finalidade, e só posteriormente serem discutidas questões relacionadas com a concepção propriamente dita destes.

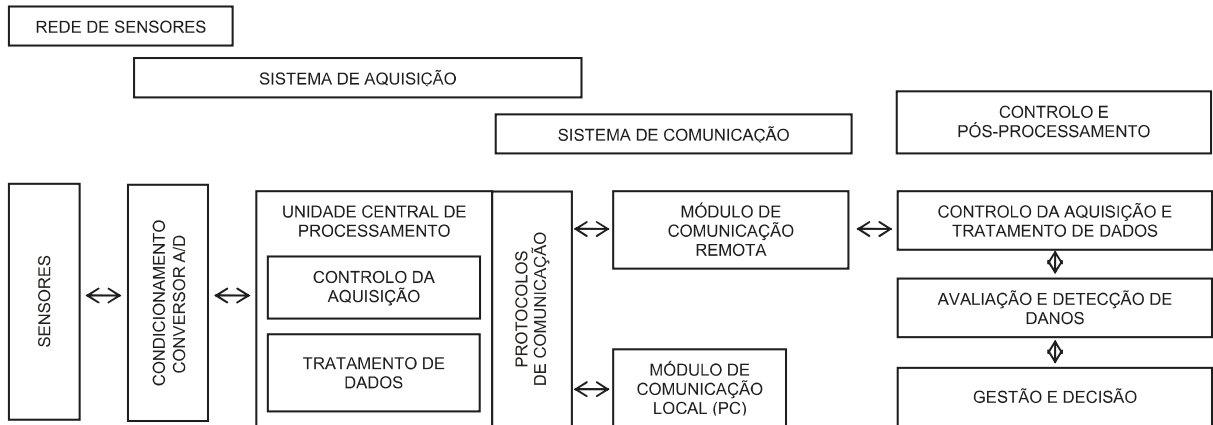


Fig. 2.11 – Esquema geral de um sistema de monitorização (Félix, 2004).

### 2.3.2. REDE DE SENSORES

A selecção do tipo de sensores a utilizar num sistema de monitorização estrutural deve ser feita em função das suas potencialidades e dos objectivos que se pretendem atingir em cada campanha de monitorização, de modo a que estes forneçam a informação pretendida com maior precisão.

Os primeiros instrumentos de medição utilizados para observação de estruturas eram exclusivamente mecânicos e não permitiam o registo e transmissão automáticos de dados, o que aliado à baixa sensibilidade, grandes dimensões e baixa resposta em frequência que estes apresentavam resultou no seu progressivo abandono. Face ao desenvolvimento electrónico foi possível desenvolver transdutores eléctricos de sinal facilmente processado, armazenado, transmitido, ou mesmo visualizado no próprio local de medição. Assim, a nova gama de sensores apresenta soluções robustas, fiáveis e estáveis no tempo. Deve também ser garantido que as suas características de medição não sejam vulneráveis a condições ambientais extremas, como temperatura e humidade, e a influências electromecânicas de campos eléctricos e magnéticos em forma de ruído, as quais podem ser precavidas ou anuladas se os sensores forem devidamente protegidos ou compensados.

Conforme a Fig. 2.11 demonstra, existem sensores com sistemas integrados de condicionamento de sinal, contudo tal pode também ser realizado no sistema de aquisição. Deste modo, opta-se por apresentar este processo no ponto referente aos sistemas de aquisição, referindo unicamente que no caso de o trajecto a percorrer pelo sinal eléctrico ser extenso, se o condicionamento deste ocorrer no próprio sensor, dado o sinal ser posteriormente transmitido em natureza binária, este não é mais susceptível à introdução de ruído (Figueiredo, 2006).

O número de sensores que constitui a rede e a sua localização na estrutura são questões que devem ser abordadas com prudência se se quiser obter uma performance satisfatória desta. No que concerne à localização dos sensores na estrutura, actualmente procura-se otimizar a sua instalação, de modo a que estes possam detectar qualquer tipo de dano estrutural antes de este se tornar crítico. Para tal existem metodologias que combinam análise probabilística com a análise estrutural, por exemplo, com recurso à modelação em elementos finitos (Mahadavan et al., 2007)

Por outro lado, a sua instalação e aplicação na estrutura deve ser tal que não introduza alterações no comportamento da mesma. De facto, actualmente, a presença dos cabos de ligação aos sensores, postos de observação e outros acessórios necessários à instalação de sistemas de monitorização de estruturas, devem ser considerados em fase de projecto.

Por fim, deve fazer-se referência aos novos sensores sem fios, os quais apresentam aplicações diversas e podem vir a constituir uma alternativa à instrumentação convencional de estruturas em obras de grandes dimensões e com elevado número de secções instrumentadas. Dada a importância desta temática inclui-se neste trabalho o subcapítulo 2.4, Redes de Sensores sem Fios, onde a mesma será aprofundada.

### 2.3.3. SISTEMAS DE AQUISIÇÃO

Existem vários tipos de sistemas de aquisição, com diversas funcionalidades. Contudo, pode-se afirmar que o sistema de aquisição é responsável pela recepção, condicionamento, armazenamento e transmissão das leituras registadas nas redes de sensores. De modo a poder processar, armazenar e transmitir os dados adquiridos pelos diversos sensores é necessário amplificar o sinal e converter este de analógico para digital (A/D), dado este estar normalmente dividido em sistema analógico e sistema digital e a transição entre ambos ser realizada recorrendo aos referidos conversores. A Fig. 2.12 esquematiza um destes tipos de sistemas de conversão A/D, bem como o encadeamento das diferentes fases de um sistema de aquisição, desde que o sinal é adquirido.

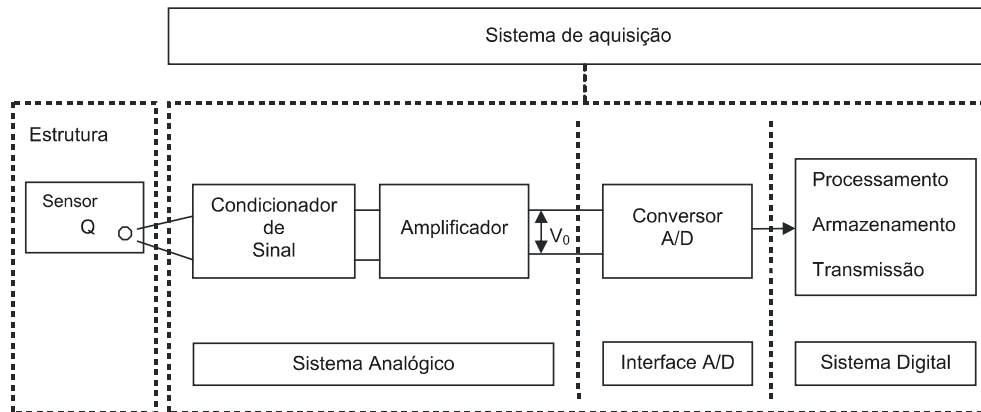


Fig. 2.12 – Esquema de um sistema de conversão A/D (Dally et al, 1993).

Os sistemas de aquisição podem ser constituídos por placas de aquisição integradas em computadores ou serem equipamentos de funcionamento autónomo dispensando ligação permanente a estes. Os primeiros são em geral equipamentos mais económicos e potentes, mas conduzem a sistemas de monitorização centralizados. Apresentam como desvantagens a necessidade de disporem de cabos de ligação aos sensores de grande comprimento e da permanência de um portátil em obra. Os segundos sistemas são em geral menos potentes, permitem interrogar um número inferior de sensores, o que os torna comparativamente mais dispendiosos. Contudo, sendo dotados de ligação em rede, permitem uma instrumentação distribuída na estrutura, com uma redução significativa do comprimento dos cabos de ligação, e por consequência, das perdas que lhe estão associadas. Podem ser facilmente instalados em caixas ou armários de protecção e apresentam consumos de energia mais reduzidos.

Na Fig. 2.13 apresenta-se um posto de observação, no qual estão integrados dois equipamentos de aquisição autónomos da série DT800 da *Data Taker*, utilizados para a aquisição de dados a partir de sensores eléctricos. Estes aparelhos constituem uma boa solução para a monitorização estrutural sob acções de média/baixa frequência. A sua versatilidade e robustez têm sido demonstradas na possibilidade de centralizar num único equipamento a capacidade de interrogar os sensores e armazenar as leituras.

Por outro lado, na Fig. 2.14 apresenta-se um sistema de aquisição da *National Instruments* do tipo modular. Este sistema, da série *CompactRio*, ou cRIO, foi desenhado para aplicações que exijam um alto desempenho e fiabilidade. Este sistema é assim capaz de adquirir sinais analógico e digital de diversos tipos de sensores, cada um com as suas necessidades específicas em termos de taxa de amostragem, nível de sinal, pré-processamento, entre outros, e é também capaz de trabalhar simultaneamente com taxas de aquisição diferentes para cada tipo de entrada.

O facto de apresentar dimensões reduzidas, robustez e flexibilidade são outras vantagens deste sistema de aquisição quando comparado com sistemas anteriores, como os da linha SCXI. Os módulos podem ser de tensão, corrente, temperatura, acelerómetros, extensão, entre outros. Por outro lado, a nível de programação, pese embora esta seja realizada em *LabVIEW* que é actualmente uma ferramenta de fácil manuseamento e bastante explorada, o sistema de aquisição *CompactRIO* é bastante mais complexo e exige maiores conhecimentos desta, dada a especificidade que apresenta para tratamento da informação obtida nos distintos módulos. Tal deve-se ao cRIO assumir também funções de controlador onde a programação é feita ao nível do processador, vulgarmente designada como programação baixo nível. Por fim, apresenta como vantagem, face ao sistema anteriormente exposto, permitir adquirir frequências mais elevadas, o que o torna ideal para ensaios estáticos e também dinâmicos, constituindo assim uma solução para sistemas de monitorização integrados para ambos os cenários, uma vez que possui memória interna.



Fig. 2.13 – Posto de observação equipado com DT800.



Fig. 2.14 – Sistema de aquisição *CompactRIO* da *National Instruments*.

### **Condicionamento de Sinal**

Dada a grande variedade de sensores desenvolvidos para transformar diferentes grandezas em sinais eléctricos analógicos, os sinais de saída produzidos podem apresentar características bastante diversas, o que implica a necessidade de em muitos casos se proceder ao condicionamento do sinal eléctrico. O condicionamento do sinal eléctrico é, assim, o conjunto de operações realizadas sobre esses sinais para os transformar numa forma adequada, e de acordo com um protocolo de comunicação estabelecido, de modo a serem interpretados por outros elementos ou equipamentos do sistema de medição.

Em muitos casos o sinal de saída apresenta uma relação não linear com a grandeza que se pretende medir, sendo assim necessário que o condicionamento de sinal analógico linearize a resposta. Como referido no ponto anterior, é igualmente frequente o condicionamento de sinal ser parte integrante do próprio sensor (Ramón et al., 2001). Este converte um tipo de variação eléctrica em outra, uma vez que um importante conjunto de transdutores mede grandezas baseando-se no princípio de alteração de resistência eléctrica, ou seja, esta variação é convertida em sinal de tensão ou de corrente.

O método mais simples de condicionamento de sinal é a alteração do nível do sinal, sendo o caso mais vulgar a ampliação ou atenuação de um nível de tensão. A importância do amplificador de sinal reside no facto de este aumentar o nível do sinal antes da sua conversão em sinal digital e, conseqüentemente, a sua precisão. Contudo, ganhos elevados no sinal de entrada podem fazer com que o sinal amplificado saia do campo de medida do sistema de aquisição (Figueiredo, 2006).

Por fim, há a referir uma outra alternativa de condicionamento de sinal designada por filtragem. Nesta pretende-se eliminar o ruído das leituras devido à agressividade do meio onde os sensores se encontram instalados. As fontes de tais leituras podem ser os próprios sensores, os cabos de ligação, as ligações dos cabos com o sistema de aquisição e o próprio sistema de aquisição, sendo que a correcta protecção dos fios de forma a isolá-los dos efeitos de flutuação de campos eléctricos e magnéticos auxilia a minimizar estes.

Deste modo, para que os sinais sejam correctamente manipulados, é usual recorrer a filtros tanto ao nível do *hardware* durante a aquisição de sinal, como ao nível do *software* aquando do tratamento dos dados. Alguns tipos de filtros utilizados durante a aquisição de sinal são passa/banda, passa/baixo, passa/alto e rejeição de banda (Félix, 2004).

### **Conversor Analógico/Digital**

O sinal de saída do amplificador, identificado como  $V_0$  na Fig. 2.12, após linearização, é proporcional à quantidade que se pretende medir e de forma a esta poder ser processada, armazenada e transmitida é necessário que exista uma interface entre o sistema analógico e o sistema digital capaz de converter a tensão  $V_0$  num sinal binário menos susceptível a introdução de ruído quando as distâncias a percorrer por este são elevadas.

### **Resolução**

A resolução de um sistema de aquisição é condicionada pelo conversor A/D e pelo número de *bits* disponíveis, sendo que se entende por número de *bits* o número de partes iguais em que o sistema consegue dividir o sinal eléctrico de entrada. Assim, conversores de maior resolução correspondem aqueles que permitem um maior número de divisões e portanto são capazes de detectar uma menor variação de sinal.

Actualmente, os sistemas de aquisição apresentam conversores A/D com 16-bits, podendo alguns atingir os 32-bits. Comparativamente com outros sistemas de aquisição, estes fornecem uma boa precisão na representação do sinal analógico para situações correntes, dado o amplo campo de medida que possuem. Todavia, para certas aplicações da monitorização estrutural, tamanha precisão pode não ser benéfica uma vez que dificulta a análise de resultados da grandeza em questão. Tal deve-se à maior sensibilidade dos valores finais à presença de ruído que resulta numa maior variação dos mesmos. Assim, a decisão final sobre o número de *bits* necessários para a aquisição de sinal depende directamente do grau de precisão pretendido, i.e. da grandeza em questão e da finalidade do sistema de monitorização instalado, daí os sistemas de aquisição correntes permitirem ajustar a resolução para valores mais baixos.

### ***Gama de Medição***

A gama de medição determina o intervalo de valores do sinal eléctrico de entrada com que o conversor A/D trabalha. À semelhança do que foi referido relativamente à resolução do sistema de aquisição, o campo de medida pode também ser ajustado. A importância de tal escolha reside no facto de a precisão das leituras aumentar quanto mais pequeno for o campo de medida.

### ***Frequência de Aquisição***

A frequência de aquisição de dados é determinada pela velocidade com que o sinal analógico é convertido em digital. Este parâmetro é ajustável e depende do tipo de medições que se pretendem efectuar (natureza estática ou dinâmica) e da frequência com que se deseja obter essas medidas.

Grandezas estruturais como deslocamentos, inclinações, assentamentos e, abertura de fendas, bem como medidas de acções ambientais, como temperatura ou humidade, são consideradas quase-estáticas, visto variarem lentamente no tempo. Em contrapartida a medição de acelerações e vibrações necessita frequências de aquisição bastante mais elevadas. Deve referir-se que um aumento da frequência de aquisição permite uma melhor caracterização da variação da grandeza, contudo, informação em excesso é contraproducente, não só pelos custos em termos de equipamento, mas também pela dificuldade acrescida na sua manipulação (Félix, 2004).

De modo a representar de forma adequada o sinal analógico, deve ser adquirido um número suficiente de dados num determinado intervalo de tempo, conforme ilustrado na Fig. 2.15. Nesta demonstra-se como o mesmo sinal analógico pode ser convertido em dois sinais digitais distintos, sendo um adequado e o outro não.

Existem sistemas de aquisição dotados de um conversor A/D partilhado em sequência por todos os canais de leitura, o que resulta num equipamento económico com frequências de amostragem dependentes do número de transdutores em aquisição. Por outro lado, existem também sistemas possuidores de um conversor por canal, os quais permitem aquisição simultânea dos diversos canais, frequências mais elevadas e independentes do número de sensores a adquirir sinal. Logicamente, estes sistemas são mais dispendiosos comparativamente com os primeiros. Em sistemas mais elaborados é possível ainda programar a activação de alarmes que no caso de leituras superiores a determinados limites previamente fixados, aumentam a frequência de leitura desses mesmos canais (Cavadas, 2008).

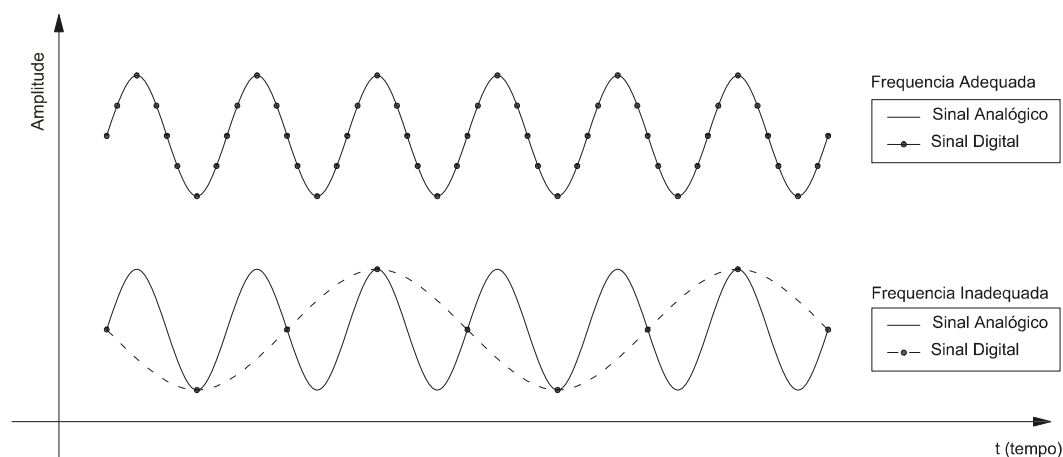


Fig. 2.15 – Comparação da reprodução dos dados em função da frequência (Figueiredo, 2006).

#### 2.3.4. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

O sistema de comunicação tem a função de permitir o acesso remoto ao sistema de aquisição instalado no local da obra e a sua materialização depende do tipo de campanha de monitorização a efectuar. Assim, a grande vantagem de um sistema de comunicação é o facto de este permitir monitorizar o comportamento de estruturas diminuindo o número de inspecções e visitas ao local. Durante a fase de testes, esta transmissão de dados é realizada com ligação directa entre o sistema de aquisição e o computador, recorrendo, por exemplo, a ligações *Ethernet* ou *USB*, enquanto em comunicações contínuas se recorre a linhas telefónicas ou internet (Mufti, 2001).

Face aos desenvolvimentos da tecnologia *wireless*, as redes sem fios começam a afirmar-se como uma alternativa à transmissão de dados nos sistemas de monitorização de ensaios estáticos e dinâmicos (Lynch, 2004).

#### 2.3.5. PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

O processamento de dados surge com o objectivo de tornar a interpretação dos mesmos mais fácil, rápida e precisa, visto que quando estes são recolhidos pelo sistema de aquisição existe excesso de informação que não é relevante e também ruído. Deste modo, é necessário um processamento inteligente de modo a poder armazenar a informação que posteriormente será alvo de estudo. Em muitos casos, este processamento é utilizado também na correcção da influência da temperatura ou outras acções indesejáveis nos dados colectados.

De modo a não sacrificar a integridade do sistema de monitorização estrutural, várias soluções para manuseamento de informação foram desenvolvidas. A primeira, e mais simples, consiste em registar unicamente alterações nas leituras ao longo do tempo, de tal forma que no caso de existirem longos períodos de tempo onde não ocorrem alterações, toda essa informação é omitida. Um exemplo prático deste cenário diz respeito à leitura de extensões nos diversos elementos estruturais de pontes e viadutos que serão praticamente constantes caso não haja atravessamento de tráfego, salvo pequenas variações devidas a efeitos como retracção ou fluência. Alternativamente, conforme referido no ponto 2.3.3, determinados sistemas optam por adquirir leituras acima de determinado valor.

Actualmente existem sistemas mais sofisticados e complexos onde ciências como a neuro-computação e redes neurais artificiais são aplicadas de modo a criar estratégias de gestão de informação mais eficientes e automatizadas (McNeil, 2004). Nestes sistemas, algoritmos são programados de modo a identificar as características e os padrões dos sinais de determinados eventos, de modo a que o próprio sistema os consiga isolar e armazenar, sem que seja necessária intervenção humana.

Após o processamento dos dados, há necessidade de os reunir, ou para constarem de uma base de dados para eventuais necessidades futuras, como o estudo da evolução da resposta da estrutura, ou para avaliações a curto prazo do comportamento da mesma. O facto das capacidades de transmissão e de armazenamento serem limitadas torna-se um problema em sistemas de monitorização contínua, por isso é crucial que os dados sejam armazenados ordenadamente e catalogados para fácil interpretação futura.

Concluindo, é importante uma selecção criteriosa da estratégia de processamento e armazenamento de dados uma vez que tal vai afectar tanto o volume de informação armazenada como o tipo de diagnóstico que desta se pode realizar.

#### 2.3.6. TRATAMENTO DE DADOS E DIAGNÓSTICO

Considerada a fase mais importante de um sistema de monitorização estrutural, o tratamento de dados e seu diagnóstico tem como objectivo transformar e interpretar a informação adquirida, filtrada e inteligentemente processada. Inicialmente procuram-se modificar os dados de modo a obter informação útil. Para tal, recorre-se ao tratamento do sinal proveniente de cada sensor e ao estabelecimento de correlações entre estes, ou seja, analisam-se dados abstractos na forma de sinais eléctricos de modo a produzir informação útil relacionada com as condições da estrutura e o seu comportamento. O conhecimento e experiência do engenheiro de estruturas são assim fundamentais nesta etapa.

O nível de complexidade da análise dependerá dos objectivos do programa de monitorização bem como do próprio sistema de monitorização instalado. Um exemplo de um estudo simples consiste na conversão de leituras de extensão em nível de tensão e comparação deste com valores limites críticos como o de cedência. O nível de complexidade pode ser tal que seja necessário recorrer a redes neurais artificiais capazes de determinar a probabilidade de uma alteração nas leituras efectuadas e indicar um tipo específico de dano, utilizando para tal métodos de comparação estatística entre esta variação e um conjunto vasto de situações de anomalias estruturais geradas através de modelação numérica (Bisby, 2005).

## 2.4. REDES DE SENSORES SEM FIOS

Uma rede de sensores sem fios (RSSF) é uma rede que consiste em dispositivos autónomos, distribuídos espacialmente, que utilizam sensores para monitorizar determinadas grandezas. Estes dispositivos são normalmente designados por nós-sensores e possuem a capacidade de se comunicarem entre si e com estações locais que procedem à interrogação, à conversão e ao armazenamento local do sinal e, posteriormente, à transmissão deste, em frequência, para uma estação central, *gateway*. Isto é, numa arquitectura de RSSF comum, os nós de medição são parte de uma rede sem fios administrada pelo *gateway*, o qual colecta os dados medidos em cada nó e os envia através de uma conexão do tipo *Ethernet* ou USB para um computador (Cho et al., 2008).

Existem, contudo, outras configurações de redes, onde se dispõe também nós-sensores encaminhadores de diferentes formas, de modo a aumentar a distância e a confidencialidade desta. Estes são semelhantes aos restantes nós, na medida em que podem adquirir dados de medição, contudo, como o próprio nome indica, permitem também transmitir dados ao longo de outros nós.

Na primeira tipologia, designada por estrela, cada nó mantém uma única via de comunicação directa com o *gateway*, o que dá origem a uma rede simples mas cuja distância total a alcançar é reduzida. De forma a aumentar esta distância, pode-se instalar uma rede do tipo *cluster*, ou árvore, cuja arquitectura é mais complexa. Nesta, cada nó-sensor tem um único caminho para o *gateway*, mas pode utilizar outros nós para encaminhar os dados ao longo desse caminho. A grande desvantagem deste cenário é a perda de comunicação de um nó encaminhador implicar igual perda de comunicação com a estação central em todos os outros nós que deste dependem. Por fim, apresenta-se uma tipologia em rede de malha que permite contornar este último problema, onde os nós mantêm múltiplas vias de comunicação. Esta última tipologia, embora muito confiável, sofre de um aumento na latência da rede, uma vez que os dados percorrem diferentes caminhos antes de chegarem à estação central. Os diferentes cenários anteriormente descritos podem ser visualizados na Fig. 2.16.

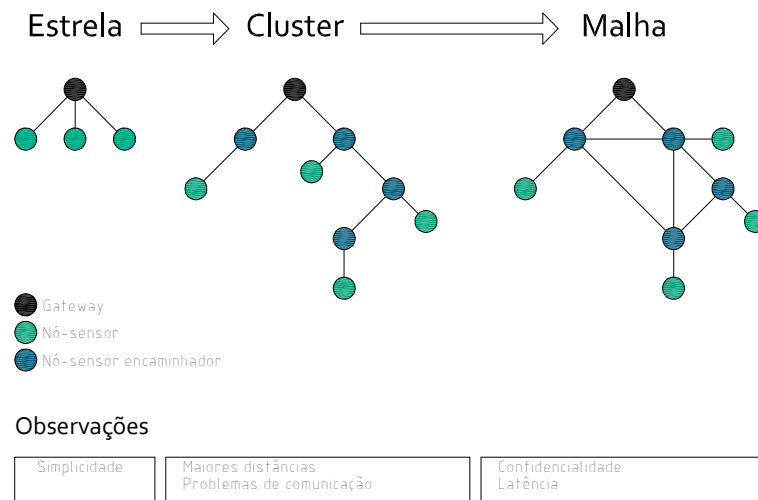


Fig. 2.16 – Tipologias de RSSF.

A utilização de cabos de ligação como elementos responsáveis pela transmissão de sinal proveniente dos sensores é a mais apropriada na grande maioria das aplicações de monitorização de estruturas de engenharia civil dado a ordem de grandeza destas não ser suficiente para introduzir problemas de interferência de natureza electromagnética. Contudo, para estruturas de maiores dimensões onde os sinais transmitidos por cablagem podem ser corrompidos por ruído excessivo ou porque é inviável a utilização de comprimentos de cabo tão elevados, as tecnologias de comunicação *wireless* assumem-se como uma alternativa à transmissão de dados dos sensores ao sistema de aquisição de sinal. Pese embora sejam redes com velocidades de transmissão mais lentas e seja difícil garantir a confidencialidade total do sinal transferido, espera-se que a sua utilização se assuma como uma alternativa a curto prazo, dado que nos sistemas de monitorização estrutural convencionais 25% do custo total e 75% do tempo de instalação se devem à instalação dos cabos (*Los Alamos National Laboratory*).

Assim, têm sido desenvolvidas novas tecnologias de transmissão sem fios, uma vez que estas podem facilitar o emprego de um maior número de sensores sem um aumento excessivo do custo do sistema de monitorização. Por outro lado, o maior obstáculo que este tipo de redes enfrenta diz respeito ao consumo de energia. Como as fontes de energia são limitadas, os nós devem cooperar entre si de modo a transportar os dados de uma forma energeticamente eficiente (Bischoff et al., 2006). A comunicação, em especial a transmissão e não a recepção, é o principal consumidor de energia. Deste modo, os nós devem adaptar-se automaticamente ao ambiente, podendo ficar adormecidos, quando não forem necessários, ou operacionais, caso seja necessário reorganizarem-se no caso de perda de algum deles ou na eventualidade de novos sensores serem adicionados à rede.

Algumas técnicas utilizadas para a redução do consumo de energia nos nós-sensores são a adopção de redes do tipo *cluster* como foi apresentado anteriormente. Neste tipo de rede os nós encaminhadores são os únicos que enviam os dados para o destino final, gastando por isso mais energia uma vez que as distâncias de transmissão são maiores. Outras técnicas de minimização de consumos de energia passam pela redução da carga computacional no sensor, protocolos eficientes, circuitos de baixo consumo, adormecimento de nós inactivos e produção local de energia com células solares, campos magnéticos, entre outros (Rezende, 2004). Actualmente, existem também equipamentos móveis capazes de gerar sinais rádio que são captados pelos sensores. Estes são automaticamente carregados, realizam leituras e enviam os sinais correspondentes destas de novo ao aparelho móvel.

A grande vantagem das redes *wireless* reside no baixo custo dos nós sensores e da confidencialidade que se tem vindo a obter com os últimos desenvolvimentos desta tecnologia. Desta forma é possível instalar centenas ou mesmo milhares de sensores de redes sem fios numa única estrutura, o que aumenta a capacidade de detectar anomalias nesta, nomeadamente a nível de análises seccionais.

## **2.5. REDES DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA**

### **2.5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Conforme foi referido, as entidades envolvidas em projectos de monitorização de estruturas de engenharia civil podem estar interessadas em diferentes tipos de informações relacionadas com o comportamento das estruturas, o que se traduz na possibilidade de utilização de diversos tipos de sensores. No decorrer da última década, um destes tipos tem vindo a ver a sua aplicação cada vez mais fomentada e a afirmar-se como uma alternativa na instrumentação de obras de arte. São os designados sensores de fibra óptica. O seu desenvolvimento deve-se sobretudo aos avanços da tecnologia de comunicação em fibra óptica e às inúmeras vantagens que estes oferecem comparativamente com os sensores convencionais, as quais foram brevemente citadas aquando da sua primeira referência nesta dissertação.

Os sensores em fibra óptica apresentam imunidade a interferências electromagnéticas, ou seja, não estão sujeitos à introdução de ruído ou à perda de sinal devido às resistências oferecidas pelas conexões e cabos do sistema de monitorização. São por isso sensores mais estáveis, que permitem que o sinal de luz seja transmitido a distâncias muito superiores, o que possibilita deslocar os sistemas de aquisição de sinal da rede de sensores. Da sua estabilidade resulta também a vantagem que estes têm em situações de leituras intermitentes, onde não são introduzidos erros ao reconectar os sensores aos restantes equipamentos do sistema de monitorização. Adicionalmente, as suas dimensões e peso reduzidos, elevada resistência contra corrosão e água e o facto de serem aplicados de forma bastante simples em qualquer tipo de estrutura, torna-os extremamente flexíveis (Graver et al., 2004).

O seu princípio de funcionamento baseia-se nas alterações físicas ou ambientais que provocam, em geral, variações na fase, na intensidade, no comprimento de onda ou na polarização da luz propagada através de uma fibra óptica pelo processo de reflexão interna total. Esta característica das fibras ópticas tem sido aplicada no desenvolvimento de sensores que permitem a medição de determinadas grandezas físicas, como a deformação, a temperatura, o nível de pH ou a humidade. Deste modo, opta-se por apresentar nesta secção alguns tipos de sensores, nomeadamente extensómetros, cujo princípio de funcionamento tem como base esta tecnologia.

Constituída por um núcleo transparente envolto por uma bainha, *cladding*, também transparente de menor índice de refração,  $n$ , a luz é transmitida entre ambas as extremidades com milhares de reflexões, mantendo toda a energia incidente do feixe luminoso dentro do próprio meio de incidência, Fig. 2.17. Adicionalmente, as fibras ópticas apresentam dois revestimentos, o primário, usualmente designado como *coating*, e secundário, cuja função é proteger estas de acções mecânicas, como o próprio manuseamento do sensor, Fig. 2.18.

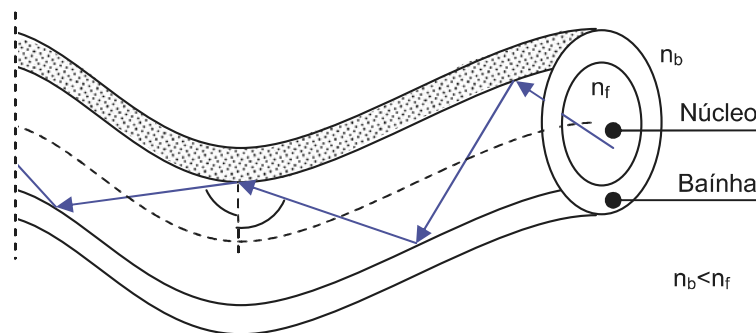


Fig. 2.17 – Luz reflectida no interior de uma fibra óptica (Félix, 2004).

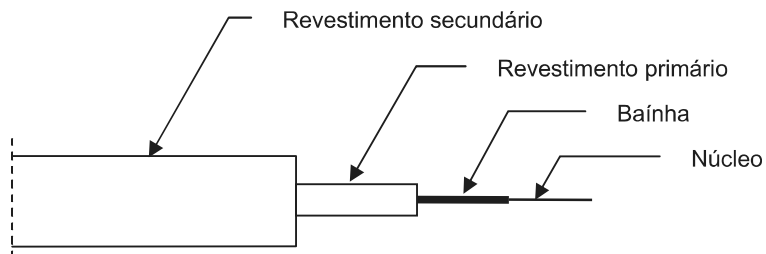


Fig. 2.18 – Constituição de uma fibra óptica (Félix, 2004).

### 2.5.2. SENSORES BASEADOS NA MODULAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA

Designados por sensores de *Bragg*, os sensores de fibra óptica baseados na modulação do comprimento de onda assentam na possibilidade de fotoinduzir numa pequena extensão do núcleo da fibra, em geral aproximadamente 1cm, uma modulação periódica permanente do índice de refração. Obtêm-se, assim, uma sucessão de espelhos de reflexão parcial que reflectem apenas os feixes luminosos com comprimento de onda proporcional ao espaçamento entre espelhos através de um fenómeno designado por difracção. A este comprimento de onda é usual atribuir-se a designação de comprimento de onda ressonante.

Apresenta-se a Fig. 2.19 a qual ilustra esquematicamente o princípio de funcionamento anteriormente descrito. Nesta,  $\lambda_0$  representa o valor de referência do comprimento de onda ressonante do espectro em reflexão.

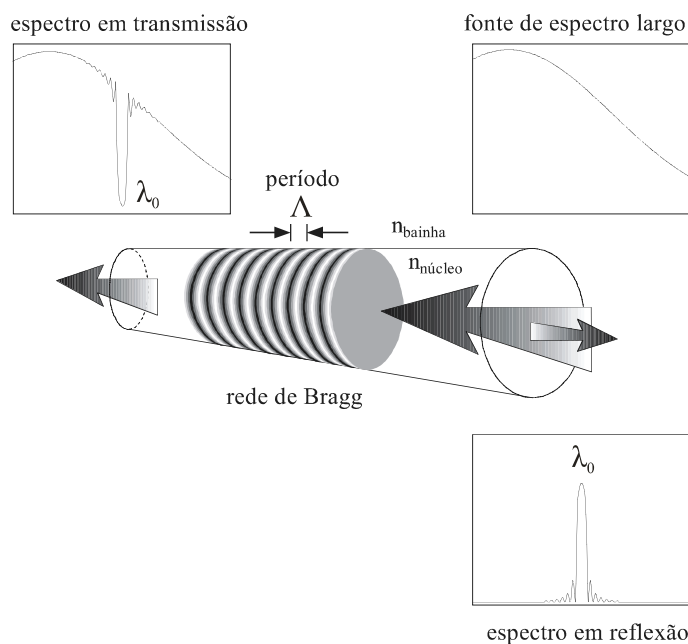


Fig. 2.19 – Princípio de funcionamento dos sensores de *Bragg* (Félix, 2004).

Da lei de difracção, ou lei de *Bragg*, expressão (2.7), conclui-se que a variação do comprimento de onda de um sensor pode resultar de alterações induzidas no período espacial de modulação da rede,  $\Lambda$ , ou de perturbações do índice efectivo de refracção,  $n_0$ , sendo que qualquer destas alterações esta relacionada com variações da deformação ou de temperatura a que o sensor esta sujeito (Félix, 2004).

$$\lambda_0 = 2 \cdot n_0 \cdot \Lambda \quad (2.7)$$

Isto é, ao depender do índice de refracção efectivo associado ao modo guiado pela fibra, ou seja, dos índices de refracção do núcleo e da bainha, e do período da rede de difracção, o comprimento de onda ressonante, será, também, função de todas as grandezas físicas que possam alterar esses parâmetros interagindo na fibra óptica que contém a rede de difracção de *Bragg*. Tal como a maioria dos sensores de fibra óptica, os sensores de *Bragg* são intrinsecamente sensíveis à temperatura, às deformações axial e transversal e à pressão. Contudo, por intermédio destas sensibilidades, principalmente da deformação axial, os sensores de *Bragg* podem ser utilizados na medição de uma grande variedade de grandezas físicas (Ferreira et al., 2004).

A variação do comprimento de onda da luz propagada pela fibra,  $\Delta\lambda$ , em relação a um valor de referência  $\lambda_0$ , é obtida pela expressão (2.8), onde  $\Delta\epsilon$  é a variação da deformação axial, ou extensão, a partir do valor de referencia,  $\Delta T$  é a variação de temperatura a partir do valor de referência e  $G_\epsilon$  e  $G_T$  os factores de ganho do sensor para o efeito da deformação e temperatura, respectivamente.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = G_\epsilon \cdot \Delta\epsilon + G_T \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

Relativamente aos factores de ganho,  $G_\epsilon$  depende das características da fibra óptica, contudo, os valores mais correntes, calculados e confirmados experimentalmente, variam entre  $0,7 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$  e  $0,8 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$ . De um modo geral,  $G_T$  está compreendido entre  $6,510 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  e  $8,510 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , dada a alteração do índice de refracção com a temperatura (Cavadas, 2008).

Uma característica também importante a ser referida é a sensibilidade,  $S$ , de um sensor *Bragg* à deformação. Segundo Félix, sensores de *Bragg* com um factor de ganho para a deformação de  $0,78 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$  apresentam uma sensibilidade de aproximadamente  $1 \text{ pm}/\mu\epsilon$  para comprimentos de onda de  $1300 \text{ nm}$ , enquanto para aqueles que operem na gama dos  $1550 \text{ nm}$  a sensibilidade à deformação aumenta para cerca de  $1,21 \text{ pm}/\mu\epsilon$ . Estas grandezas podem ser relacionadas recorrendo à equação (2.9).

$$S_{\epsilon} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta\epsilon} = \lambda_0 \cdot G_{\epsilon} \quad (2.9)$$

Deste tipo de redes salienta-se ainda a vantagem comparativamente às restantes que consiste na possibilidade de transmitir, em simultâneo, sinais provenientes de diferentes sensores através de um mesmo condutor, possuindo características tais que façam com que estes possam ser identificados e adquiridos isoladamente.

As técnicas de modulação do comprimento de onda com este objectivo são conhecidas como técnicas de multiplexagem e, dada a sua corrente aplicação, introduz-se aqui a técnica de multiplexagem espacial, *Wavelength Division Multiplexing*, onde para cada sensor são definidos comprimentos de onda central distintos, Fig. 2.20, aos quais é depois possível associar cada um dos espectros de reflexão adquiridos.

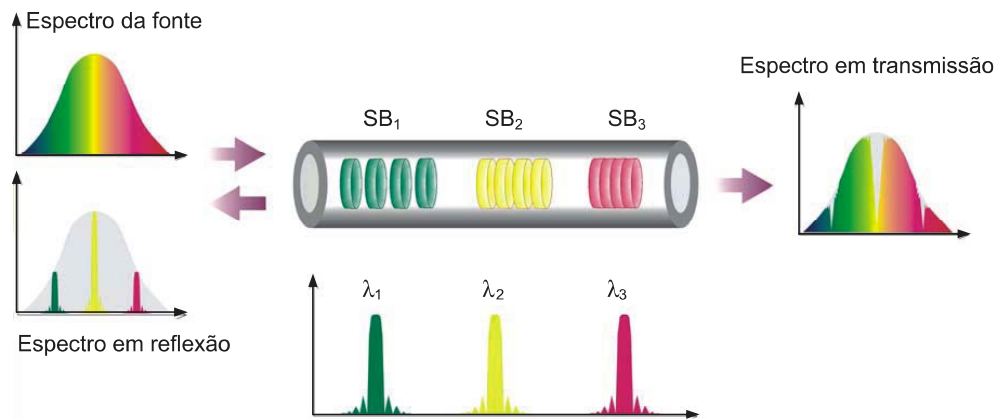


Fig. 2.20 – Técnica de multiplexagem espacial (Félix, 2004).

A multiplexagem espacial pode ser realizada dispondo os sensores de *Bragg* ao longo de uma mesma fibra óptica, ou em fibras ópticas distintas reunidas num multiplexador, sendo que a primeira disposição é usual designar-se por multiplexagem em série, enquanto a segunda em paralelo. Salienta-se a importância de, no caso de multiplexagem em série, os valores de referência dos comprimentos de onda da rede de sensores terem obrigatoriamente de apresentar um afastamento mínimo tal que o espectro em reflexão, associado a cada um destes, não se sobreponha. Assim, é necessário prever a variação máxima do comprimento de onda de cada sensor, a qual dependerá do nível de deformação aplicada à estrutura, no caso da rede ser formada por extensómetros.

Relativamente aos sistemas de aquisição destas redes de sensores, estes podem incluir uma grande diversidade de equipamento opto-electrónico, mas no essencial têm como componentes um analisador de espectros ópticos, uma fonte óptica de espectro largo e um acoplador óptico, Fig. 2.21.

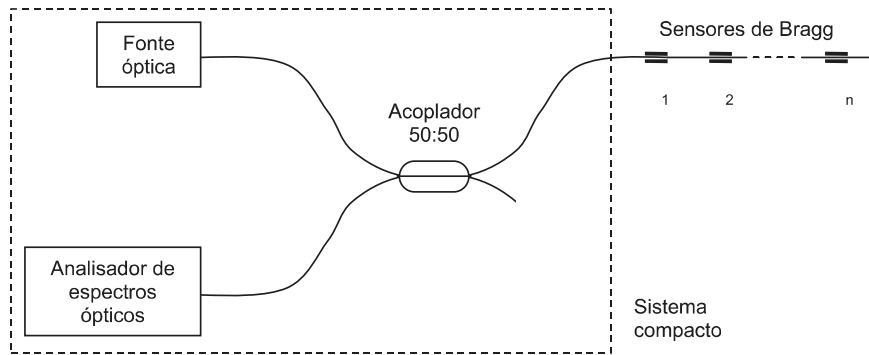


Fig. 2.21 – Representação de sistema de aquisição de redes de Bragg (Félix, 2004).

Dado que na presente dissertação não se utilizaram redes de sensores de Bragg no controlo e medição de temperatura, inclui-se aqui uma breve referência a um ensaio realizado com o objectivo de comparar a resposta dada por um cabo óptico contendo vários sensores deste tipo e o sensor convencional termopar que foi já descrito no ponto relativo à medição de temperatura. Este ensaio consistiu em submeter os sensores a ciclos térmicos entre os  $-40$  e os  $70^{\circ}\text{C}$  ao longo de 120h e os resultados obtidos encontram-se ilustrados na Fig. 2.22.

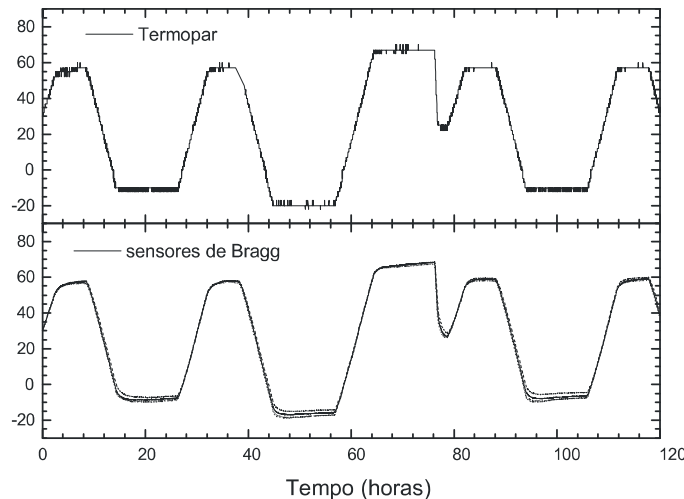


Fig. 2.22 – Monitorização da temperatura com sensores de Bragg (Frazão et al., 2005).

Conforme esta evidencia, as medições realizadas com ambas as soluções ajustam-se perfeitamente, o que indica uma boa linearidade dos sensores ópticos também na medição de temperaturas. Por outro lado, na zona de patamar a temperatura constante, o termopar apresenta alguma variação e ruído no sinal adquirido, enquanto os mesmos patamares se encontram perfeitamente definidos com sensores de Bragg.

Por fim, inclui-se o Quadro 2.5 com algumas especificações de extensómetros da marca *FiberSensing* uma vez que estes serão instalados em laboratório com o intuito de avaliar o desempenho de sensores baseados na modulação do comprimento de onda.

Quadro 2.5 – Especificações de extensómetros da *FiberSensing*.

| Sensibilidade [pm/ $\mu\epsilon$ ] | Gama de medição [ $\mu\epsilon$ ] | Comprimento de onda [nm] | Gama de Temp. [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Dimensões [mm]                            | Peso [g] |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---|----------|
| 1,20                               | 4000                              | 1510 – 1590              | -20 – 80                             | 40x12x0,2<br>(cabos de 1m para cada lado) | 5        |

### 2.5.3. SENSORES BASEADOS NA MODULAÇÃO DA FASE

Existem sensores baseados na modulação da fase da luz, os quais recorrem à interferometria óptica. Esta técnica consiste na sobreposição de duas ou mais ondas de luz de entrada que criam uma nova, e diferente, onda que pode ser usada para explorar as diferenças entre as primeiras.

A diferença de fase das ondas é determinada consoante o efeito destas no sistema detector, sendo este materializado por um fotodetector utilizado para medir a intensidade luminosa. No caso dos dois sinais possuírem a mesma fase a intensidade luminosa medida no fotodetector é máxima, enquanto no cenário de estes estarem em oposição de fase a intensidade lida é mínima.

Dado esta tecnologia não ser aplicada nos pontos futuros da presente dissertação opta-se apenas por introduzir a configuração mais simples da rede de sensores de fibra óptica baseados na modulação da fase. Esta é conhecida como configuração de *Michelson* e encontra-se representada na Fig. 2.23a). Nesta, a luz proveniente de uma fonte luminosa é dividida num acoplador entre duas fibras ópticas, designando-se uma como fibra activa, dado deformar-se solidariamente com a estrutura, e a outra fibra de referência, cuja deformação é independente desta. A localização de espelhos nas extremidades de ambas as fibras tem como objectivo reflectir a luz em direcção ao acoplador, onde mais uma vez é dividida de modo a parte do sinal óptico poder ser enviado para o fotodetector. Neste avalia-se a diferença de fase entre a luz proveniente das duas fibras, uma vez que a variação do comprimento da fibra activa induz uma variação de fase da luz reflectida nesta (Félix, 2004). Inclui-se na Fig. 2.23 a configuração das redes *Fabry-Perot*, visto estas serem as mais utilizadas no que diz respeito a redes de sensores em fibra óptica baseados na modulação da fase, pese embora não permitam multiplexagem em série (Bisby, 2005).

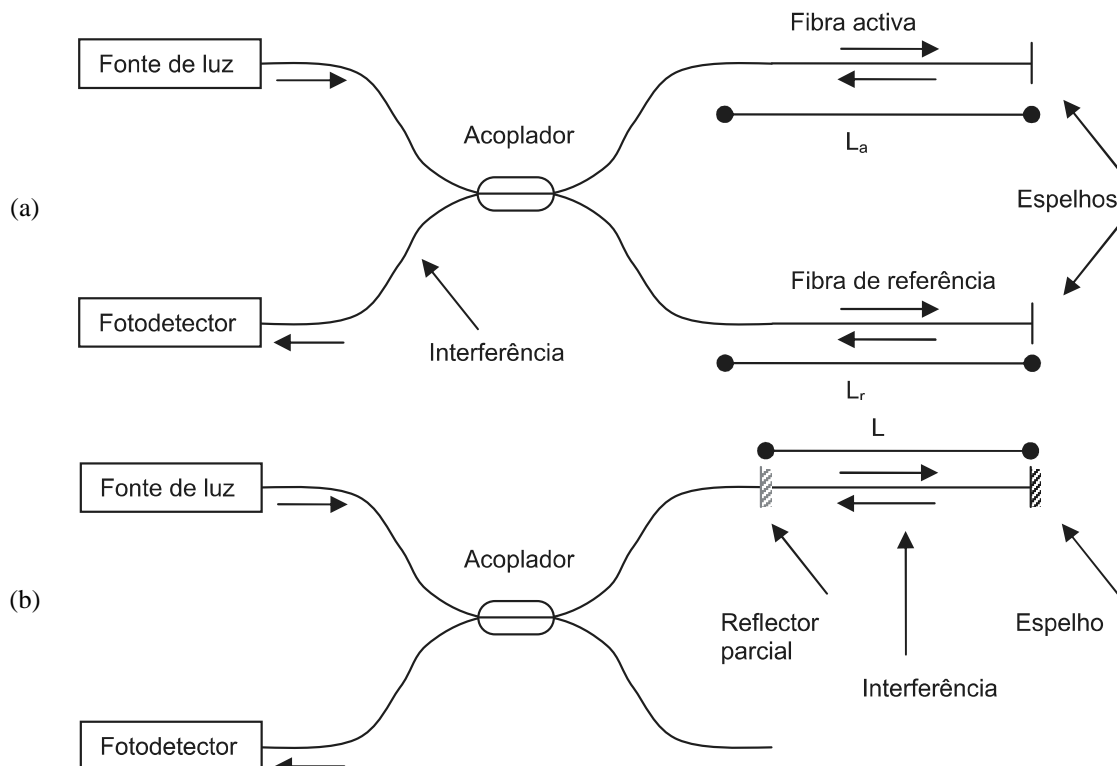


Fig. 2.23 – Configurações de sensores interferométricos: a) *Michelson*; b) *Fabry-Perot* (Félix, 2004).

## 2.6. MONITORIZAÇÃO EM DIFERENTES FASES DE INTERVENÇÃO

A monitorização estrutural é um conceito que deve estar presente durante as diversas fases da vida de uma obra, em especial nas de maior dimensão ou nas de maior complexidade (Félix, 2004). A monitorização tem como objectivos principais o controlo da estrutura e a verificação da conformidade do seu comportamento conforme previsto em projecto. Apesar dos objectivos fundamentais serem coincidentes, podem distinguir-se pela especificidade das informações a obter, três grandes fases ao nível da monitorização. A primeira diz respeito à fase de concepção, a segunda à de aferição do comportamento da estrutura e conformidade com o projecto durante a execução da obra, e a última ao acompanhamento da sua utilização em condições de serviço.

### *Fase de Projecto*

Cabe ao projectista definir as grandezas a medir, as secções a instrumentar, o número de sensores a aplicar e a frequência com que as medições devem ser realizadas, visto este ser o interveniente em todo o processo da obra que melhor e mais profundamente conhece a estrutura. Este estudo é realizado em fase de concepção e projecto com o objectivo de conhecer o comportamento das secções consideradas críticas, isto é, as que se preveja que venham a ser sujeitas a maiores deformações, e também das secções correntes que se considerem representativas do comportamento global da obra.

De facto, o sucesso da observação estrutural depende da sua preparação, pelo que é indispensável definir atempadamente as fases a monitorizar e seleccionar as grandezas a medir. Assim, já em fase de projecto é fundamental prever as condições necessárias à instalação de um sistema de monitorização, tais como a garantia de acessibilidade aos elementos e secções relevantes da estrutura passíveis de campanhas de monitorização (Santos et al., 2000).

Na realidade, a aplicação de um sistema de monitorização desde o início da construção pode interferir com o desenvolvimento do projecto na medida em que algumas hipóteses de cálculo poderão vir a ser confirmadas *in situ* com as medições efectuadas durante a execução da obra, ou suscitar ajustes ao projecto inicial. Estas informações constituem uma mais-valia na concepção das estruturas uma vez que se traduzem numa maior confiança no sistema estrutural adoptado, permitindo a adopção de soluções arrojadas, o desenvolvimento de novas técnicas construtivas e a adopção de novos materiais.

Note-se que as informações recolhidas no âmbito de uma obra em concreto podem fornecer informação relevante para o desenvolvimento de obras com características semelhantes, podendo todo o processo ser melhorado (Cavadas, 2008).

### *Fase de Execução*

O acompanhamento da execução da obra fornece informações relevantes sobre o seu comportamento. Em sistemas estruturais correntes é comum a observação de grandezas que permitam dar uma percepção global do comportamento da estrutura, através da medição, por exemplo, de flechas nos vãos aquando da descofragem.

Assim, em trabalhos de maior dificuldade e em faseamentos construtivos de maior complexidade, a monitorização de grandezas a partir das quais seja possível o controlo contínuo do processo construtivo é da maior importância, dado a monitorização permitir avaliar se o processo decorre como previsto, avaliando a necessidade de proceder a verificações e correcções de eventuais desvios.

Durante a execução da obra a estrutura vai sofrendo alterações de geometria, das condições de apoio, das propriedades resistentes e das próprias acções aplicadas. Assim, é compreensível que durante esta fase muitas secções possam estar submetidas a tensões e deformações superiores às observadas em fase de serviço, pelo que o seu controlo através de uma adequada instrumentação é crucial. Por outro lado, quando se pretende conhecer com exactidão o valor absoluto de tensões instaladas numa dada secção a necessidade de proceder à medição dessa grandeza desde o início é incontornável (Félix, 2004).

Por fim, após a conclusão da obra, e antes de se dar início ao seu período de exploração, é corrente a realização de ensaios de carga no sentido de aferir a conformidade desta. Isto é, estabelecem-se comparações entre grandezas medidas e previstas em modelos numéricos desenvolvidos.

### *Fase de Serviço*

Durante o período de vida útil das obras de engenharia civil, as campanhas de inspecção visual devem ser acompanhadas por um sistema de monitorização eficiente. Este deve permitir observar a evolução de grandezas relevantes à sua caracterização de um ponto de vista de resposta estrutural.

No acompanhamento da evolução do comportamento estrutural durante a fase de serviço, os sistemas de monitorização utilizados visam a medição de diversas grandezas com um intervalo de tempo pré-definido. Esta frequência é, em geral, bastante reduzida contudo em estruturas mais complexas, cujo nível de importância assim o exige, podem ser integrados sistemas de vigilância. Através de sensores capazes de detectar acções excepcionais sobre a estrutura, são desencadeados procedimentos de aquisição a frequências mais elevadas e a medição de outros parâmetros não relevantes numa monitorização da evolução contínua. Desta forma, é possível observar o efeito sobre a estrutura de acções que de outro modo seriam dificilmente detectáveis.

Em princípio, se a estrutura for monitorizada por um período de tempo suficientemente largo, é possível avaliar a condição da estrutura e detectar a ocorrência de dano. Dependendo da densidade e do nível da instrumentação, a monitorização contínua também poderá permitir a previsão da localização de dano e a forma como ele terá ocorrido (Cavadas, 2008).

Assim, a instalação de um sistema de monitorização devidamente integrado num sistema de gestão de obras de arte permite prever e programar atempadamente as intervenções a efectuar. Além disso, num cenário de necessidade de trabalhos de reabilitação, as informações recolhidas durante o acompanhamento da estrutura fornecem informações importantes para o desenvolvimento do projecto. A monitorização contínua além de servir de base ao estudo do comportamento real das estruturas, fornece informações fundamentais aos processos de decisão ao nível da gestão de estruturas, quer em termos de procedimentos de manutenção, quer ao nível de projectos futuros, na medida em que permite avaliar a eficiência das soluções adoptadas (Farhey, 2005).

## 2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objectivo deste capítulo introdutório aos sistemas de monitorização foi o de apresentar segundo uma óptica um pouco mais teórica as características e potencialidades do que se considera ser uma área de elevado interesse do ramo das estruturas. De uma forma clara e objectiva, as características e potencialidades da monitorização estrutural foram debatidas com o intuito de fazer transparecer a importância que este tema assume no sector da construção civil e obras públicas.

Muitas vezes a análise estrutural é complexa e difícil, na medida em que existem muitos parâmetros difíceis de quantificar correctamente. Assim, optou-se por apresentar, em primeiro lugar, os processos de medição de grandezas que mais correntemente são utilizados na observação do comportamento estrutural de obras de engenharia civil, visto que, para extrair unicamente a informação essencial ao estudo das condições das estruturas monitorizadas, é fundamental perceber quais as melhores formas de medição. Deste modo, apresentaram-se diferentes soluções para o controlo de deslocamentos, extensões, temperatura, rotações e acelerações, sendo que para cada sensor em concreto se expôs o seu modo de funcionamento e aplicações, bem como as limitações e vantagens face a outras soluções com iguais finalidades.

Seguidamente, introduziram-se as diversas partes constituintes de um sistema de monitorização e expuseram-se conhecimentos teóricos necessários ao entendimento do seu funcionamento. Optou-se por dividir este em rede de sensores, sistema de aquisição e de comunicação, processamento e armazenamento de informação, tratamento de dados e, por último, avaliação do comportamento estrutural. Neste ponto abordaram-se características inerentes aos diferentes subsistemas de modo a obter-se um conhecimento mais sólido e um maior domínio em algumas das suas especificidades.

No subcapítulo 2.4 introduziu-se um novo conceito de redes de sensores. Também conhecidas como redes *wireless*, este tipo de redes tem vindo a assumir um papel cada vez mais importante em projectos de monitorização de estruturas, nomeadamente em obras cuja ordem de grandeza assim o justifica. Neste ponto abordaram-se diferentes configurações e arquitecturas que as redes podem assumir, as principais vantagens de utilizar esta tecnologia de comunicação e os seus principais inconvenientes.

Por outro lado, não só ao nível da tecnologia *wireless* se têm verificado enormes progressos. No decorrer da última década um tipo de redes de sensores que também tem vindo a ver a sua aplicação cada vez mais fomentada são os sensores de fibra óptica, daí a sua inclusão no ponto 2.5 onde se descreveram as inúmeras vantagens que estes oferecem comparativamente com sensores convencionais, as aplicações mais correntes dos mesmos e também as suas limitações. Introduziram-se as redes de *Bragg*, visto ser um dos objectivos desta dissertação aplicar sensores deste tipo e avaliar o seu desempenho.

Concluindo, teceram-se algumas considerações no que diz respeito às diferentes fases de intervenção da monitorização de obras, de modo a sublinhar a importância desta área no apoio à decisão dos diversos intervenientes envolvidos na concepção, construção e exploração destas.

# 3

## CASO DE ESTUDO PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Após desenvolvida a fundamentação teórica sobre a qual assenta a presente dissertação, pretende-se aqui introduzir de forma sucinta o caso de estudo desenvolvido no âmbito do projecto “Civiónica – Uma Área Interdisciplinar Emergente”, do programa “Iniciação à Investigação” da Universidade do Porto.

Realizado no seio da unidade de investigação LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, deste trabalho constam diferentes aplicações de monitorização estrutural, quer em laboratório quer em ambiente de obra. É justamente na sequência dos diferentes ensaios conduzidos em laboratório que se apresenta este capítulo.

Feito o enquadramento, para além das presentes considerações, este documento é constituído por outros três subcapítulos. No subcapítulo 3.2 descreve-se o modelo instalado, quer a nível da geometria da estrutura, como do sistema de carregamento utilizado. No subcapítulo 3.3, Sistema de Monitorização, define-se a rede de sensores utilizada nas diferentes aplicações laboratoriais, bem como os sistemas de aquisição que completam os sistemas de monitorização instalados. Os procedimentos laboratoriais realizados, sua divisão, classificação e objectivos são apresentados no subcapítulo 3.4.

### 3.2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

#### 3.2.1. GEOMETRIA DO MODELO

O modelo utilizado em laboratório para avaliação do desempenho de um sistema de monitorização é constituído por uma viga metálica HEB100, simplesmente apoiada. Apresenta-se na Fig. 3.1 a sua geometria, bem como o pórtico onde se encontra inserida, as condições de apoio e o sistema de carregamento, o qual será explorado em maior detalhe no subcapítulo 3.2.2

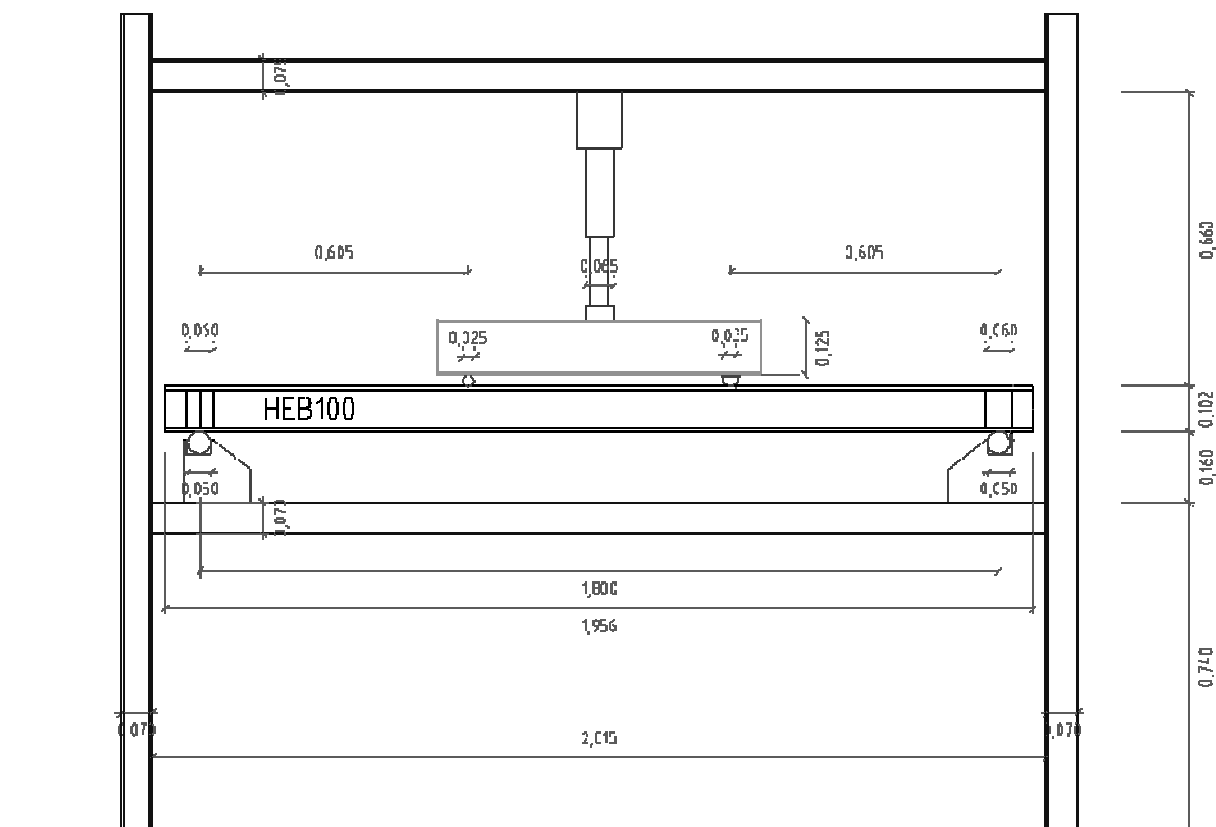


Fig. 3.1 – Geometria do modelo e envoltente.

Relativamente ao perfil metálico HEB100, as características da secção padrão podem ser consultadas no Quadro 3.1. Contudo, deve ser referido que em laboratório as dimensões exactas do perfil não coincidem com as expectáveis. Assim, as dimensões reais deste são as apresentadas na Fig. 3.2. Adicionalmente, diversos códigos indicam para o módulo de elasticidade do aço 200GPa, contudo a experiência demonstra que o valor real deste é superior, questão que será debatida no Capítulo 4 desta dissertação.

Quadro 3.1 – Propriedades do perfil metálico HEB100.

| Secção          | $g$<br>[kg/m] | $h$<br>[mm] | $b$<br>[mm] | $t_w$<br>[mm] | $t_f$ [mm] | $r$ [mm] | $A$<br>[mm <sup>2</sup> ×10 <sup>2</sup> ] | $I_v$<br>[mm <sup>4</sup> ×10 <sup>4</sup> ] |
|-----------------|---------------|-------------|-------------|---------------|------------|----------|--|--|
| HE 100 B padrão | 20,4          | 100         | 100         | 6             | 10         | 12       | 26,0                                       | 449,5  |
| HE 100 B real   | 21,1          | 102         | 103         | 6             | 10         | 12       | 27,0                                       | 483,4  |

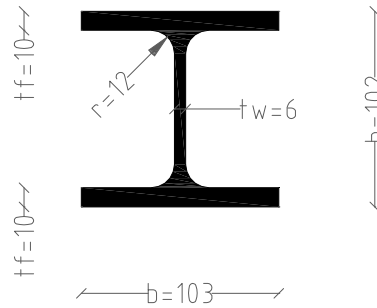


Fig. 3.2 – Dimensões exactas da secção em [mm].

Por fim, incluem-se o esquema estrutural, bem como os diagramas de esforços internos, nomeadamente o esforço transverso e o momento flector, Fig. 3.3. Estes serão particularmente úteis aquando da comparação e avaliação de resultados obtidos no sistema de monitorização instalado em laboratório com os valores teóricos obtidos recorrendo às formulações da Mecânica Estática e da Resistência dos Materiais.

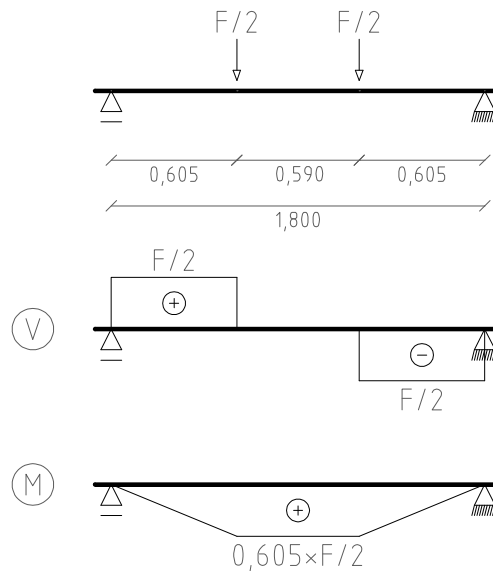


Fig. 3.3 – Esquema estrutural da viga e esforços internos.

### 3.2.2. SISTEMA DE CARREGAMENTO

O sistema de carregamento utilizado em laboratório para ensaiar o modelo é o apresentado nas Fig. 3.4 e Fig. 3.5. Este consiste num actuador hidráulico manual e numa célula de carga, cujo limite máximo de força é 50kN. A célula de carga possui um transdutor utilizado para converter uma força num sinal eléctrico. No caso da célula de carga utilizada, o princípio de funcionamento baseia-se na medição da deformação que essa força provoca numa peça localizada no interior da célula, a qual se encontra devidamente instrumentada por extensómetros de resistência eléctrica, cujo modo de desempenho foi apresentado no Capítulo 2. A sua configuração usual é de oito extensómetros ligados num circuito de ponte de *Wheatstone*, o que permite ligar directamente a célula de carga ao sistema de aquisição de modo a transmitir o sinal eléctrico desta, o qual é posteriormente convertido no valor da força aplicada.



Fig. 3.4 – Actuador hidráulico manual.



Fig. 3.5 – Célula de carga ligada ao actuador.

### 3.2.3. CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

Entende-se por calibração o conjunto de operações que estabelecem, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento (calibrador) e os valores correspondentes da grandeza a medir.

Os sensores e transdutores analógicos apresentam normalmente um certificado de calibração válido por um ano, ou seja, garante-se que nesse período de tempo as conversões de grandezas, obtidas de medições feitas com esses sensores, são consideradas correctas. Contudo, para leituras realizadas com instrumentos em que se suspeite que esse período foi vencido e se pretendam gamas de precisão conforme as especificações do mesmo é recomendável proceder à sua calibração. Apresenta-se de seguida o procedimento realizado em laboratório para calibrar a célula de carga, bem como os resultados obtidos.

Calibrar a célula de carga, conforme exposto anteriormente, implica determinar a constante que traduz a relação entre o sinal de saída desta e a grandeza que realmente importa controlar, i.e., relacionar a razão entre tensões eléctricas de entrada e saída lidas na ponte, ppm, com a força aplicada, kN. A forma mais fácil de obter esta constante implica a existência em laboratório de uma célula de carga já calibrada, que possa ser utilizada como padrão aquando do carregamento da célula a calibrar. Deste modo há um conhecimento exacto e preciso da força aplicada. Assim, é possível ligar as duas células

de carga a um sistema de aquisição e, posteriormente, tratar a informação recebida com o objectivo de estabelecer a relação pretendida.

Na presente calibração, de forma a obter uma constante a mais fidedigna possível, optou-se por realizar diferentes tipos de carregamentos, nomeadamente um ensaio de carga/descarga constituído por três ciclos dos 0kN aos 50kN, e outros três ensaios de carga/descarga contendo patamares de 10kN em 10kN. Com vista a existir um melhor controlo sobre estes ensaios, a célula de referência utilizada é do tipo automático, com possibilidade de ser programado o esquema de carga.

No Quadro 3.2, apresenta-se o resumo das características das células de carga utilizadas no procedimento de calibração.

Quadro 3.2 – Especificações células de carga utilizadas

| Célula de Carga | Tipo    | S/N    | Carga máxima [kN] | Constante [kN/ppm] |
|-----------------|---------|--------|-------------------|--------------------|
| A calibrar      | TCLU-5A | B01082 | 50                | ?                  |
| De Referência   | TC4     | 514558 | 500               | 0,10845            |

### Ensaio – Ciclos

Na Fig. 3.6 apresenta-se o ensaio cíclico a que se submeteu a célula de carga. Conforme referido este ensaio é constituído por três ciclos dos 0kN aos 50kN. Pelo facto de ambas as células de carga estarem ligadas ao sistema de aquisição, *DataTaker800*, representa-se, em função do tempo, o sinal de saída destas. Uma vez que a constante entre o sinal e a força aplicada é conhecida na célula de referência, é possível relacionar a força aplicada à célula a calibrar e o sinal recebido desta de modo a determinar para esta última a constante que relaciona as duas grandezas.

Em ensaios do tipo cíclicos é boa prática isolar os diferentes ciclos e estudá-los separadamente, de forma a aumentar o rigor e exactidão das conclusões retiradas. Consequentemente, neste procedimento estabeleceram-se três relações entre o sinal de saída da célula a calibrar e a força aplicada, esta última obtida indirectamente pelo produto do sinal de saída da célula de referência e da sua constante, relativas aos três ciclos de carga/descarga realizados.

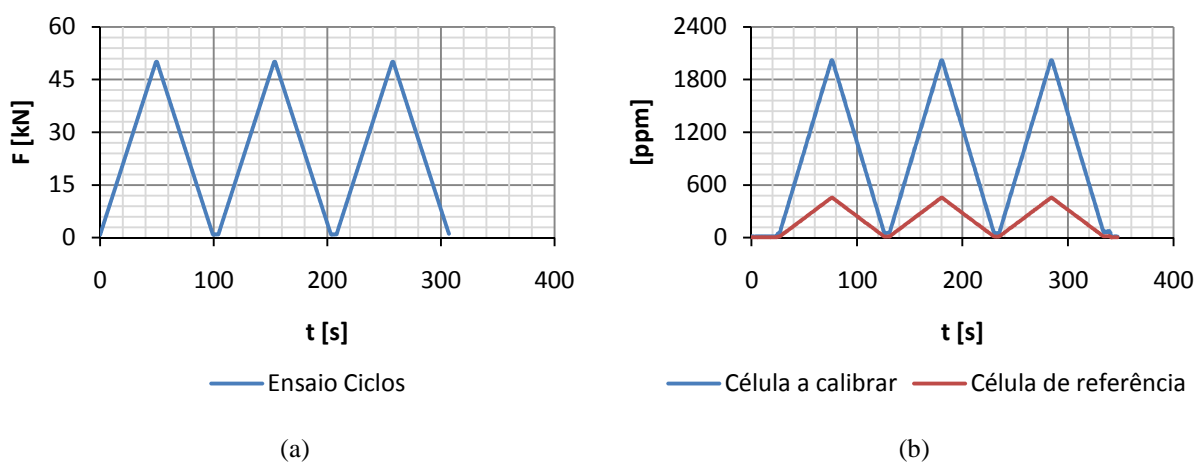


Fig. 3.6 – Ensaio cíclico realizado: a) Ciclos de Carga/descarga; b) Sinais de saída recebidos.

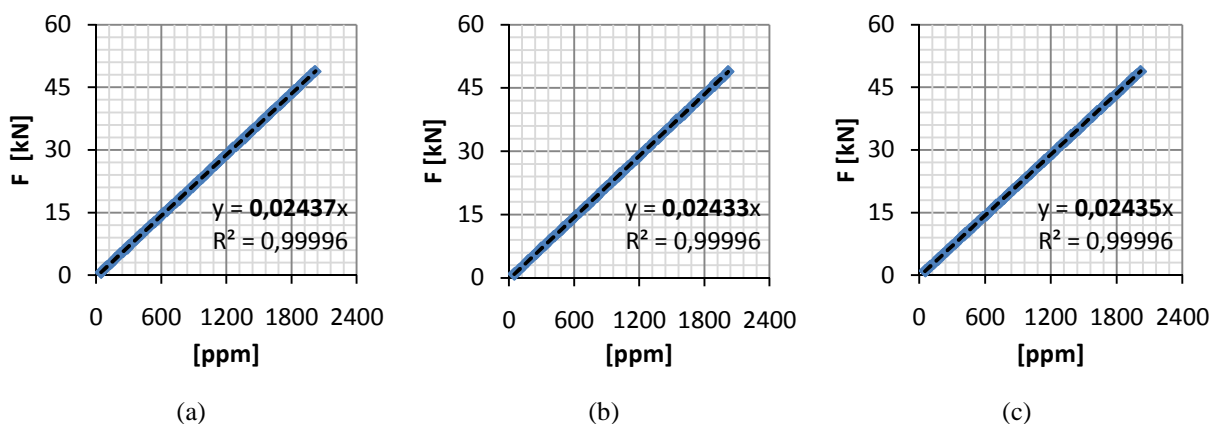


Fig. 3.7 – a)  $C_1=0,02437$  kN/ppm; b)  $C_2=0,02433$ kN/ppm; c)  $C_3=0,02435$ kN/ppm.

### Ensaios – Patamares

Realizaram-se também três ensaios onde as cargas e descargas se procederam com patamares sucessivos de 5 segundos, de 5kN em 5kN. A importância deste tipo de ensaios reside no facto de se poderem determinar valores mais exactos do sinal de saída para valores de carga mais baixos, uma vez que se investiga patamar a patamar e se determina, para cada um destes, a média dos valores adquiridos pelo sistema de aquisição.

Na Fig. 3.8, Fig. 3.9 e Fig. 3.10, apresentam-se as cargas/descargas dos ensaios efectuados e os sinais de saída recebidos das células de carga a calibrar e de referência.

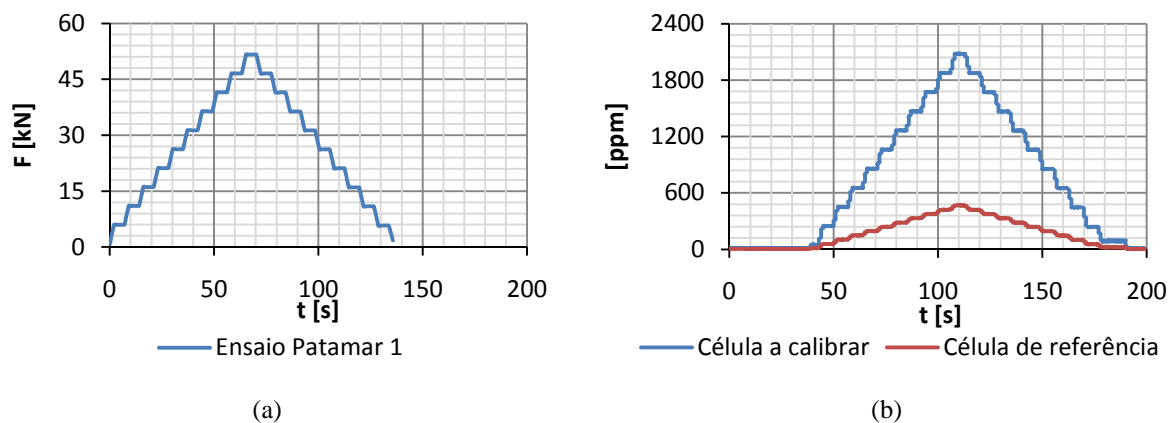


Fig. 3.8 – Primeiro ensaio com patamares: a) Carga/descarga; b) Sinais de saída recebidos.

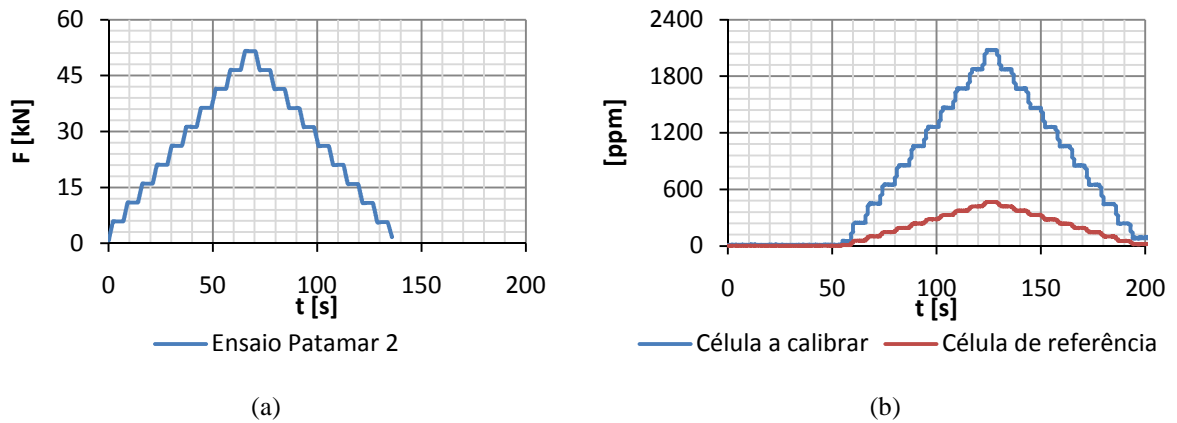


Fig. 3.9 – Segundo ensaio com patamares: a) Carga/descarga; b) Sinais de saída recebidos.

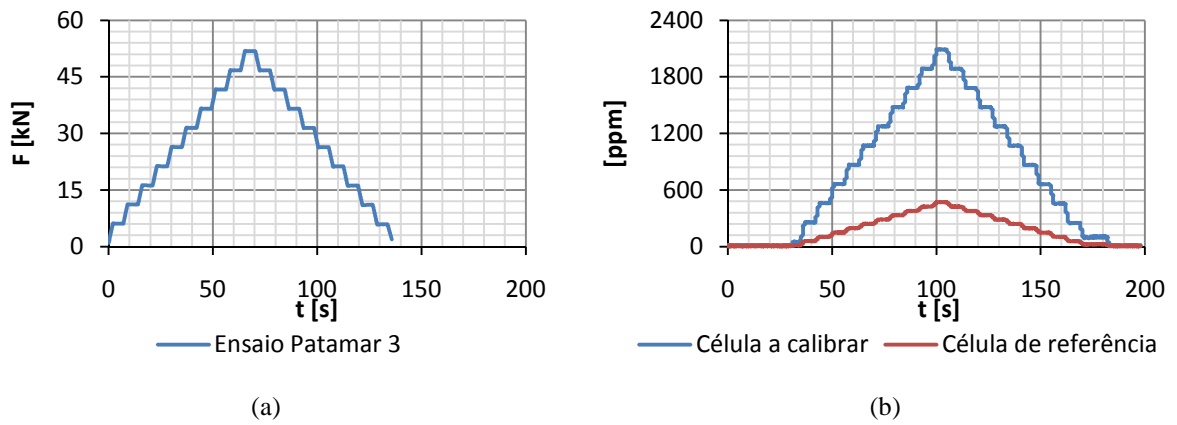


Fig. 3.10 – Terceiro ensaio com patamares: a) Carga/descarga; b) Sinais de saída recebidos.

De acordo com o que foi exposto anteriormente, apresenta-se a Fig. 3.11, onde se relaciona a média do sinal de saída da célula de carga a calibrar por patamar com a carga desse respectivo patamar. Esta última, à semelhança do que foi exposto relativamente aos ensaios cíclicos, foi determinada multiplicando a constante de proporcionalidade da célula de carga de referência pela média do sinal de saída do mesmo patamar na referida célula. De salientar que para cada nível de carga existem dois pontos, um relativo à fase de carga da célula e o outro à fase de descarga.

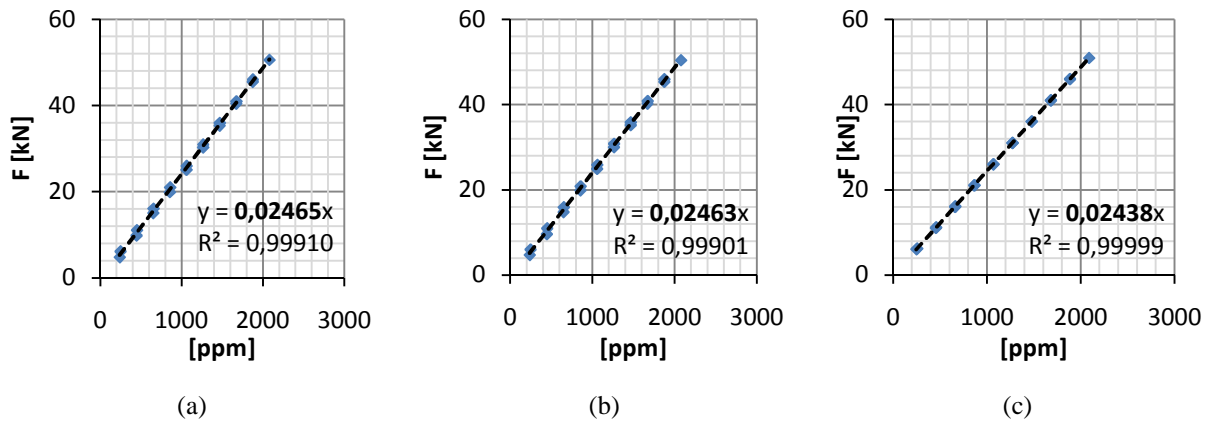


Fig. 3.11 – a)  $C_1=0,02465\text{kN/ppm}$ ; b)  $C_2=0,02463\text{kN/ppm}$ ; c)  $C_3=0,02438\text{kN/ppm}$ .

### Conclusões

Com base nos valores apresentados para ambos os tipos de ensaios, conclui-se que a constante de proporcionalidade entre o sinal de saída da célula de carga a calibrar e a força aplicada é 0,02445kN/ppm.

Caso o alcance da célula utilizada como referência fosse mais baixo, o rigor na calibração teria sido superior, uma vez que a carga realmente aplicada por esta, 50kN, é bastante inferior ao máximo que a prensa consegue obter, 500kN.

Apresenta-se ainda o Quadro 3.3, onde se pode visualizar o resumo das informações obtidas em cada ensaio.

Quadro 3.3 – Resumo dos procedimentos de calibração.

| Procedimento  | Ensaio    | Constante [kN/ppm] | Desvio Relativo [%] |
|---------------|-----------|--------------------|---------------------|
| Cíclico       | 1º Ciclo  | 0,02437            | 0,08                |
|               | 2º Ciclo  | 0,02433            | -0,08               |
|               | 3º Ciclo  | 0,02435            | 0,00                |
| Média         |           | 0,02435            |                     |
| Com patamares | 1º Ensaio | 0,02465            | 0,39                |
|               | 2º Ensaio | 0,02463            | 0,31                |
|               | 3º Ensaio | 0,02438            | -0,71               |
| Média         |           | 0,02455            |                     |

### 3.3. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

#### 3.3.1. REDE DE SENSORES

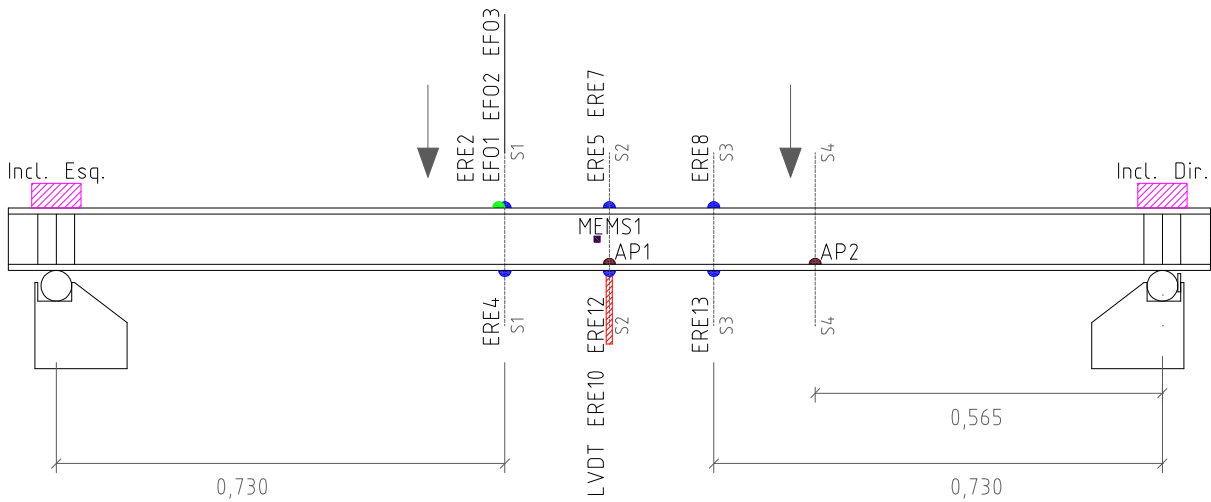
O demonstrador laboratorial anteriormente apresentado foi instrumentado em diferentes secções de modo a poder avaliar o desempenho de um sistema de monitorização de estruturas, objectivo principal da presente dissertação. Assim, na sequência do que foi exposto no Capítulo 2, instalou-se uma rede de sensores capaz de caracterizar o comportamento global e local da estrutura, estudando grandezas como deslocamentos, rotações e extensões.

Foram instrumentadas quatro secções, Secção S1, S2, S3 e S4 (Fig. 3.12) das quais três estão localizadas entre os pontos de aplicação da carga. Nestas últimas constam oito extensómetros de resistência eléctrica, três extensómetros em fibra óptica, um LVDT, um acelerómetro do tipo MEMS e um acelerómetro piezoeléctrico. Instalaram-se ainda inclinómetros nos apoios do perfil e na Secção S4 um segundo acelerómetro piezoeléctrico de modo a estudar modos de vibração que não o fundamental. A Fig. 3.12 apresenta a localização longitudinal das secções e a identificação da rede de sensores sumariamente descritas anteriormente. Por outro lado, a Fig. 3.13 localiza e identifica a mesma rede de sensores por secção transversal. A importância destas figuras reside no facto da notação apresentada corresponder à utilizada em todos os estudos subsequentes deste trabalho.

Inclui-se o Quadro 3.4 o qual contém informação importante relativa aos diferentes sensores, tais como, modelos, números de série e constantes de calibração, obtidas directamente nas especificações técnicas destes ou em trabalhos anteriores realizados no LABEST. Ao longo desta dissertação, aquando da apresentação das medições e resultados das diferentes grandezas estruturais, far-se-á nova referência às constantes de calibração e às expressões nas quais estas se inserem.

Quadro 3.4 – Constantes de calibração dos sensores utilizados.

| Sensor    | Marca                     | Modelo                                   | S/N   | Constante | Unidade           |
|-----------|---------------------------|--|-------|-----------|-------------------|
| ERE       | -                         | -  | -     | 2,10      | -                 |
| EFO1      | <i>WellTech</i>           | <i>Bare strain sensor</i>                | -     | 1,00      | pm/ $\mu\epsilon$ |
| EFO2      | <i>FiberSensing</i>       | <i>Standard polyimide strain sensor-</i> | -     | 1,20      | pm/ $\mu\epsilon$ |
| EFO3      | <i>FiberSensing</i>       | <i>Miniature strain sensor</i>           | -     | 1,20      | pm/ $\mu\epsilon$ |
| Incl.Esq. | <i>Jewell Instruments</i> | LSO                                      | 65160 | 0,1215    | °/mA              |
| Incl.Dir. | <i>Jewell Instruments</i> | LSO                                      | 61151 | 0,1262    | °/mA              |
| LVDT      | RDP Group                 | ACT2000                                  | 945   | 0,0113    | mm/mV             |
| MEMS1     | Analog Devices            | ADXL203                                  | -     | 1000      | mV/g              |
| AP1 / AP2 | <i>PCB Piezotronics</i>   | 352B10                                   | -     | 10        | mV/g              |



LEGENDA

|  |   |
|--|---|
|  | Incl.Esq. - Inclínometro Esquerda             |
|  | Incl.Dir. - Inclínometro Direita              |
|  | EF01 - Extensometro em Fibra Optica 1         |
|  | EF02 - Extensometro em Fibra Optica 2         |
|  | EF03 - Extensometro em Fibra Optica 3         |
|  | ERE2 - Extensometro Resistencia Electrica 2   |
|  | ERE4 - Extensometro Resistencia Electrica 4   |
|  | ERE5 - Extensometro Resistencia Electrica 5   |
|  | ERE7 - Extensometro Resistencia Electrica 7   |
|  | ERE10 - Extensometro Resistencia Electrica 10 |
|  | ERE12 - Extensometro Resistencia Electrica 12 |
|  | ERE8 - Extensometro Resistencia Electrica 8   |
|  | ERE13 - Extensometro Resistencia Electrica 13 |
|  | LVDT - Sensor de Deslocamento                 |
|  | MEMS1 - Acelerometro do tipo MEMS 1           |
|  | AP1 - Acelerometro Piezoelectrico 1           |
|  | AP2 - Acelerometro Piezoelectrico 2           |

Fig. 3.12 – Representação longitudinal da rede de sensores.

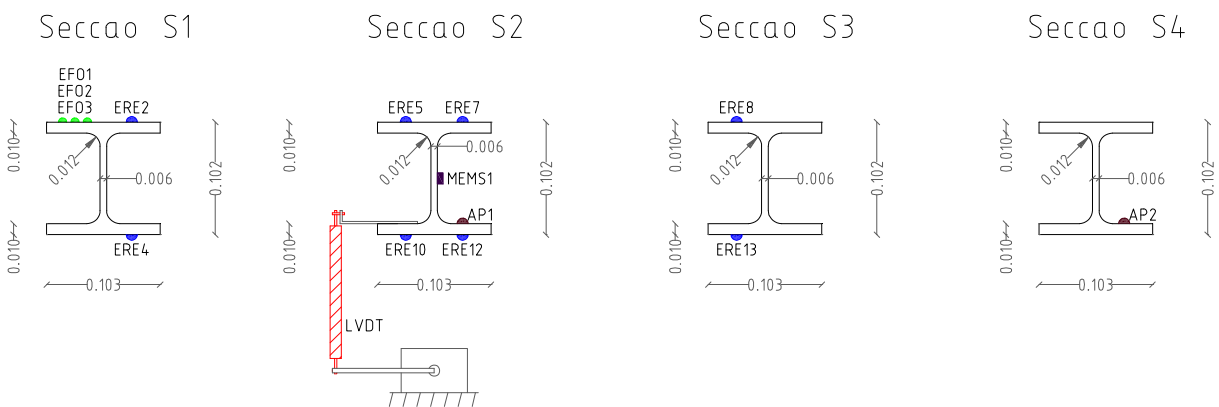


Fig. 3.13 – Secções transversais e rede de sensores instalada.

### 3.3.2. SISTEMAS DE AQUISIÇÃO

Conforme debatido no Capítulo 2, os Sistemas de Aquisição que se pretendem utilizar em laboratório são o *DataTaker800*, ou DT800, e o *CompactRIO* da *National Instruments* (NI). No que concerne à instrumentação com recurso a sensores em fibra óptica, o sistema de interrogação adoptado é o modelo sm130 da *Micron Optics*.

O sistema DT800 constitui uma boa solução para monitorização estrutural sob acções de média/baixa frequência e apresenta-se como uma solução versátil dado possuir a capacidade de interrogar diversos sensores e armazenar no equipamento as leituras realizadas, Fig. 3.14. É de referir que o LABEST possui já uma larga experiência e confiança na utilização destes sistemas, tanto em obra como em laboratório, uma vez que estes se assumem como aparelhos fidedignos de fácil programação.

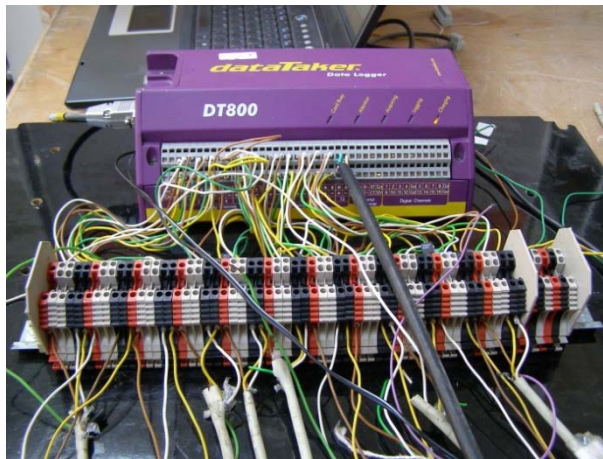


Fig. 3.14 – Sistema de aquisição DT800 instalado no laboratório.

Por outro lado, o *CompactRio* (cRIO) é uma das mais recentes tecnologias da NI e desse facto resulta um menor conhecimento na sua aplicação. Contudo, as potencialidades deste sistema são inúmeras do ponto de vista do *hardware* propriamente dito, logo para aplicações cuja frequência de aquisição é consideravelmente superior, i.e. ensaios dinâmicos, tentar-se-á explorar esta solução.

Faz-se ainda referência a um terceiro sistema de aquisição, o *CompactDAQ* (cDAQ) também da *National Instruments*, Fig. 3.15.

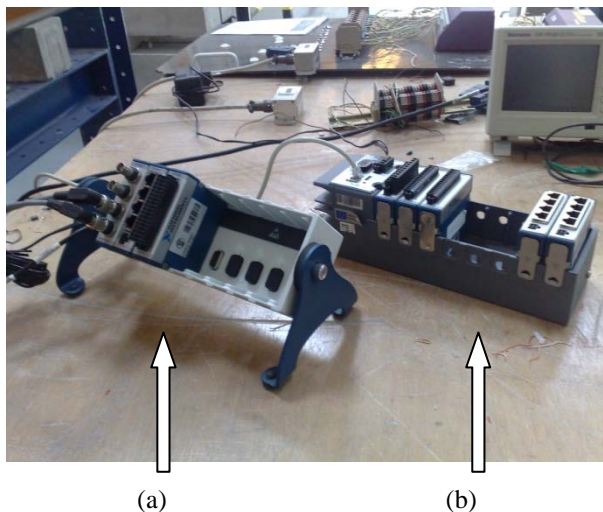


Fig. 3.15 – Sistemas de aquisição: a) *CompactDAQ*; b) *CompactRIO*.

O facto de se introduzir aqui um segundo sistema do tipo modular, cDAQ, deve-se ao facto deste também exibir a possibilidade de aquisição de sinais analógico e digital de diversos tipos de sensores, cada um com as suas necessidades específicas em termos de taxa de amostragem, nível de sinal, pré-processamento, entre outros, e é também capaz de trabalhar, simultaneamente, com taxas de aquisição diferentes para cada tipo de entrada. Desta forma, pode substituir o *cRIO* em aplicações laboratoriais, pese embora o cDAQ seja um sistema mais antigo, e conseqüentemente mais limitado do ponto de vista do aparelho em bruto. A sua grande vantagem é possuir códigos e *software* próprios para leitura dos diferentes módulos, os quais permitem uma utilização consideravelmente mais fácil e rápida do equipamento. Assim, o sistema de aquisição cDAQ funciona unicamente como interface entre os diferentes módulos e o computador a que está ligado, não assumindo papel de controlador. Contudo, mesmo com uma programação ao nível da carta, ou seja, alto nível, o *CompactDAQ* pelo facto de não possuir memória de armazenamento não se traduz numa solução viável para aplicações em obra.

Por último, relativamente ao sistema de interrogação dos sensores em fibra óptica, este consiste numa solução compacta, o sm130 da *MicronOptics*, Fig. 3.16, que inclui os diversos componentes que foram apresentados na exposição teórica deste tipo de rede de sensores no capítulo anterior. Não obstante as características que foram aí apresentadas, a grande vantagem deste sistema de aquisição reside no facto de conseguir receber simultaneamente um elevado número de sensores a frequências altas, com um máximo de quatro fibras. Utilizado também no registo de outras grandezas como acelerações, temperaturas ou pressões, este equipamento terá como objectivo a leitura de deformações axiais.



Fig. 3.16 – Sistema de Aquisição da *MicronOptics*, sm130 .

### 3.4. PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Neste ponto descrevem-se os diferentes tipos de procedimentos laboratoriais utilizados para avaliar o desempenho dos sistemas de monitorização de estruturas mencionados anteriormente. Estes podem ser divididos em duas grandes categorias, dizendo a primeira respeito a ensaios estáticos, enquanto a segunda a ensaios dinâmicos.

Por sua vez, na realização de ensaios estáticos, estes podem ser subdivididos naqueles cuja rede de sensores é constituída por sensores eléctricos ou por sensores ópticos. Por sua vez, o tipo de carregamento utilizado dá origem a dois tipos de ensaios. O primeiro destes consiste em ciclos de carga/descarga dos 0kN aos 50kN, à semelhança do que foi feito aquando da calibração da célula de carga, e o segundo a uma carga, igualmente dos 0kN aos 50kN, com incrementos no valor de 10kN de modo a se conseguirem definir patamares onde a viga se encontra submetida a carga constante ao longo de um determinado intervalo de tempo. Os ensaios estáticos realizados com a rede de sensores eléctricos foram cinco, e encontram-se sumariamente descritos no Quadro 3.5. Relativamente aos ensaios estáticos da rede de sensores em fibra óptica realizaram-se três, conforme apresentado no Quadro 3.6.

Dado o sistema de carregamento utilizado ser manual não é possível nos ensaios cíclicos de carga/descarga adquirir sinal aquando da descarga da estrutura, uma vez que a frequência de aquisição do *DataTaker800* é inferior ao tempo em que a estrutura é descarregada. Relativamente aos ensaios por patamares, dado o actuador de pressão utilizado apresentar pequenas fugas, foi impossível manter o nível de tensão aplicada constante. Contudo, a diminuição sentida não compromete a análise dos valores obtidos. Por fim, refere-se que tanto os 50kN mencionados como valor máximo nos ensaios cíclicos, como os incrementos de 10kN em 10kN para os ensaios com patamares, são cargas meramente indicativas, uma vez que é fisicamente impossível atingir valores exactos com um sistema de carga manual, dado o nível de força aplicado ser controlado em função do sinal de saída da célula de carga adquirido no DT800 e lido no computador portátil a este ligado.

De modo a diferenciar os ensaios realizados com sensores eléctricos e os ensaios com recurso a tecnologia óptica, apresentar-se-ão estes em capítulos distintos na presente dissertação.

Por último, refere-se o ensaio dinâmico realizado na fase final dos trabalhos da presente dissertação. Uma vez que neste não se obtiveram resultados conclusivos, remeteu-se a sua apresentação para o Anexo B desta dissertação. Neste ensaio, para simular um impulso sobre o perfil metálico, optou-se por suspender na Secção S4 uma massa de valor conhecido, nomeadamente 10kg e 15kg, a qual é libertada instantaneamente de forma a simular uma força pontual de sentido ascendente. Com este procedimento pretende-se analisar a vibração e as acelerações sentidas pela estrutura.

Quadro 3.5 – Ensaio estáticos conduzidos em laboratório com sensores eléctricos.

| Ensaio | Descrição                     | Sensores                                  | Objectivo  |
|--------|-------------------------------|---|--|
| 1      | 1 Ciclo de Carga, 0-40kN      | 11 Extensómetros                          | Seleção rede de extensómetros<br>Determinação módulo de elasticidade do aço    |
| 2      | 3 Ciclos de Carga, 0-50kN     | 8 Extensómetros                           | Avaliação módulo de elasticidade determinado                                   |
| 3      | 1 Carga com patamares, 0-50kN | 8 Extensómetros                           | Avaliação módulo de elasticidade determinado                                   |
| 4      | 3 Ciclos de Carga, 0-50kN     | 8 Extensómetros, 2 Inclínómetros e 1 LVDT | Estudo de extensões, rotações e flechas. Verificação Teoria das Peças Lineares |
| 5      | 1 Carga com patamares, 0-50kN | 8 Extensómetros, 2 Inclínómetros e 1 LVDT | Estudo de extensões, rotações e flechas. Verificação Teoria das Peças Lineares |

Quadro 3.6 – Ensaio estáticos conduzidos em laboratório com sensores em fibra óptica.

| Ensaio | Descrição                     | Sensores  | Objectivo  |
|--------|-------------------------------|---|--|
| 6      | 3 Ciclos de Carga, 0-50kN     | 1 Extensómetros Eléctrico e 3 Extensómetros de Fibra Óptica | Avaliar comportamento à compressão de diferentes Extensómetros Ópticos |
| 7      | 3 Ciclos de Carga, 0-50kN     | 1 Extensómetros Eléctrico e 3 Extensómetros de Fibra Óptica | Avaliar comportamento à tracção de diferentes Extensómetros Ópticos    |
| 8      | 1 Carga com patamares, 0-50kN | 1 Extensómetros Eléctrico e 3 Extensómetros de Fibra Óptica | Avaliar comportamento à tracção de diferentes Extensómetros Ópticos    |

# 4

## AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO DESEMPENHO DE SENSORES ELÉCTRICOS

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A essência da monitorização de estruturas baseia-se na interpretação de medições realizadas a diferentes grandezas, visto um sistema de monitorização ter como principal objectivo fornecer informação, a mais pormenorizada possível, que caracterize o comportamento das estruturas. Todavia, muitas vezes a análise estrutural e a identificação de problemas é complexa e difícil, na medida em que existem muitos parâmetros difíceis de quantificar correctamente.

O número de sensores que constitui a rede e a sua localização na estrutura são questões que devem ser abordadas com prudência, se se pretende obter um desempenho satisfatório. Por outro lado, a sua instalação e aplicação deve ser tal que não introduzam alterações no comportamento da estrutura. A selecção do tipo de sensores a utilizar deve ainda ser feita em função das suas potencialidades e dos objectivos que se pretendem atingir, de modo a que aqueles forneçam a informação pretendida com maior precisão.

De facto, a importância que a rede de sensores assume num sistema de monitorização é crucial, e é justamente segundo esta óptica que se insere este capítulo. O conhecimento do seu funcionamento e a avaliação do seu desempenho são os objectivos principais a desenvolver nos pontos seguintes. Deste modo, estudar-se-ão soluções clássicas de equipamentos medidores de grandezas estruturais como extensões, rotações de apoio e flechas. Procura-se ao longo deste capítulo avaliar o seu desempenho, recorrendo à comparação das correspondentes medições no demonstrador laboratorial com os valores teóricos obtidos da Resistência de Materiais e de um modelo numérico.

Incluem-se assim sete secções neste capítulo. Nas secções 4.2, 4.3, 4.4, 4.6 e 4.7 apresentam-se os ensaios estáticos desenvolvidos no LABEST, comparando-se os resultados obtidos com aqueles previstos pela bibliografia. Por outro lado, a avaliação das mesmas grandezas físicas é realizada no ponto 4.8 com recurso aos dados retirados do modelo gerado. Por último, tecem-se no subcapítulo 4.9 algumas considerações finais bem como as conclusões retiradas deste trabalho.

## 4.2. ENSAIO ESTÁTICO 1

Com o objectivo de seleccionar a rede de extensómetros final e aferir sobre o valor correcto do módulo de elasticidade do aço da viga representada na Fig. 4.1, o Ensaio Estático 1 foi conduzido com apenas um carregamento dos 0 aos 40kN. O sistema de monitorização instalado neste ensaio apresenta uma rede de onze sensores de extensões, a qual estará na base de todos os estudos realizados.

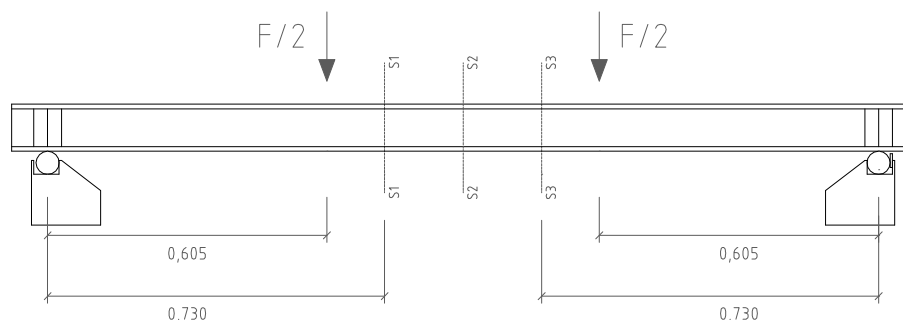


Fig. 4.1 – Perfil metálico HEB100 a ensaiar em laboratório.

Numa primeira fase dos procedimentos laboratoriais decidiu-se averiguar os resultados dos onze extensómetros, na tentativa de detectar eventuais falhas na colagem destes à viga instrumentada, respostas menos satisfatórias, ou mesmo aparelhos com anomalias. Conforme referido anteriormente, o objectivo é reduzir o número de extensómetros instalados na rede de sensores de onze para oito. Destes onze extensómetros, identificados nas figuras pelo canal a que estão ligados ao sistema de aquisição, cinco estão instalados no banzo superior e os restantes seis no banzo inferior. Relativamente a localização longitudinal, três encontram-se na Secção S1, cinco na Secção S2 e por fim três na Secção S3. Pretende-se com o estudo que se segue que os extensómetros finais apresentem boas leituras e desvios reduzidos, e procura-se também que a sua localização seja equilibrada, quer relativamente ao número de sensores instalados no banzo inferior e superior do perfil, como ao longo do desenvolvimento do mesmo.

Para a conversão de grandezas entre sinal de saída dos extensómetros eléctricos,  $B_{out}$ , e *microstrain*,  $\mu\epsilon$ , designação inglesa para micro-extensão, aplicou-se a expressão:

$$\mu\epsilon = \frac{4}{G \cdot N} \cdot B_{out} \quad (4.1)$$

em que o valor do coeficiente de sensibilidade  $G$  utilizado é 2,10, o que representa uma alteração de resistência de 2,1% para uma deformação de 1% no extensómetro, e  $N$  designa o número de braços activos na ponte de *Wheatstone*, que neste caso é igual a um.

Apresentam-se na Fig. 4.2 as medições realizadas no Ensaio Estático 1. Nesta verifica-se que a variação do sinal de saída  $\Delta B_{out}$  assume valores positivos e negativos, consoante o sensor está localizado no banzo inferior ou superior. Igualmente, aquando da conversão desta variação de sinal em variação de *microstrain*, os valores negativos dizem respeito aos extensómetros submetidos a deformações de compressão, enquanto os valores positivos estão associados aos extensómetros solicitados à tracção.

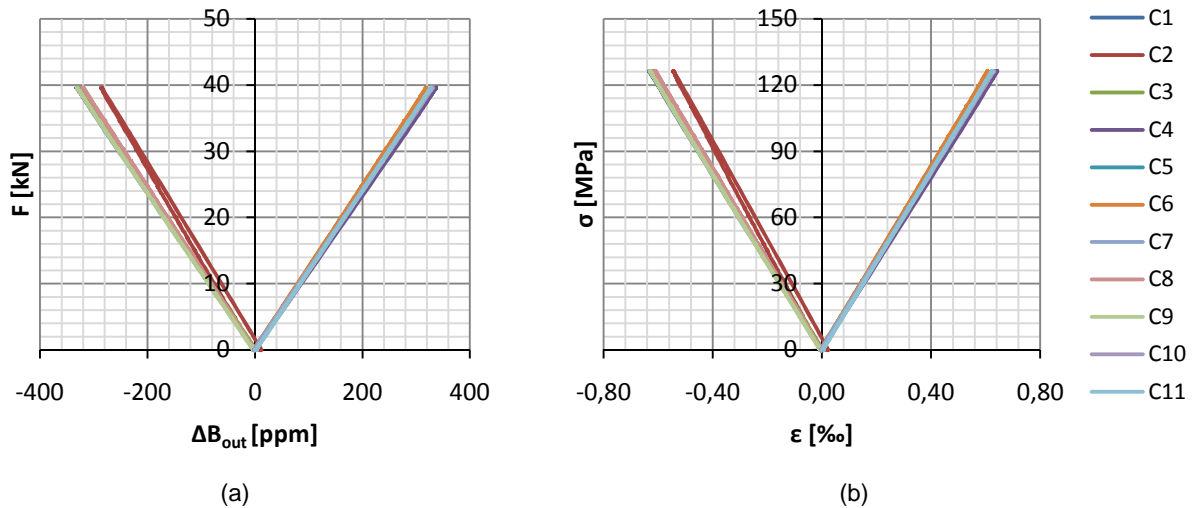


Fig. 4.2 – Medições com extensómetros: a) variação do sinal; b) conversão em extensão.

De facto, conclui-se que o extensómetro conectado ao Canal 2 não se encontra em boas condições, dada a diferença para os restantes sensores localizados no banzo superior. Após esta constatação, analisou-se em pormenor o estado deste extensómetro e verificou-se que este se encontrava mal colado à estrutura, e que o próprio cabo responsável por estabelecer a ligação entre este e o DT800 também se encontrava deteriorado.

Seguidamente, optou-se por analisar as respostas dos extensómetros à tracção e compressão e comparar aqueles com a média de extensões verificada no respectivo banzo, Fig. 4.3.

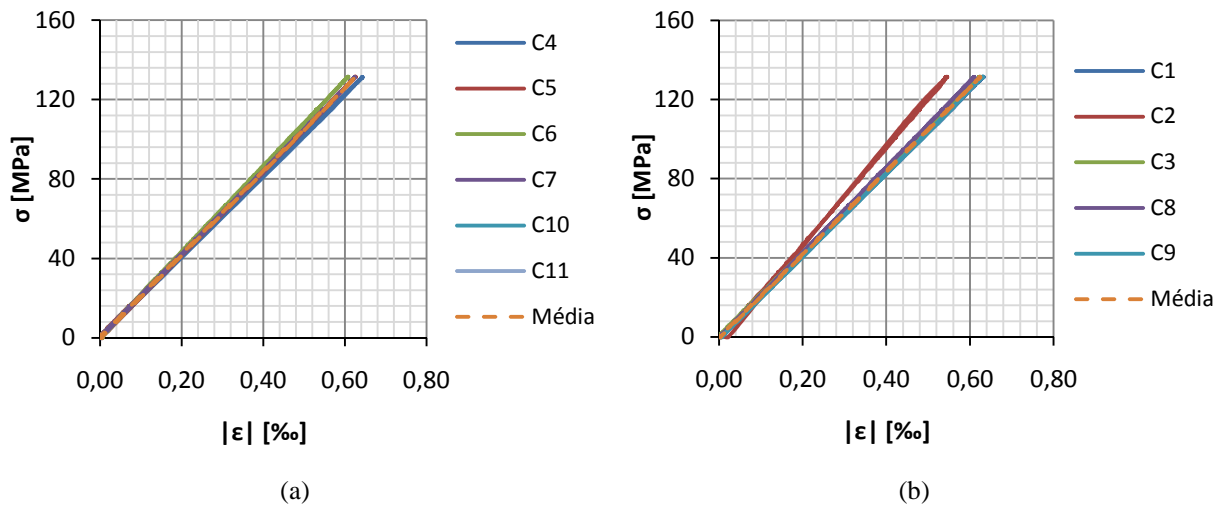


Fig. 4.3 – Estudo dos extensómetros: a) banzo inferior; b) banzo superior.

Calculou-se ainda o desvio de cada extensómetro em relação à média, Fig. 4.4, sendo que nesta análise se desprezou o extensómetro ligado ao Canal 2 pelas razões anteriormente citadas.

Desta análise verifica-se que em todos os extensómetros analisados o desvio relativo é inferior a 3% após alcançados os 50MPa de tensão aplicada aos banzos. Por outro lado, na fase inicial de carregamento o desvio é muito superior, uma vez que aquando da pré-carga, intervalo de tempo no início do ensaio no qual se instala um estado de tensão relativamente baixo na viga, esta sofre ligeiras perturbações devido ao contacto do actuador com o perfil de distribuição de carga, deste com os roletes de transmissão de carga à estrutura e desta última com os correspondentes apoios.

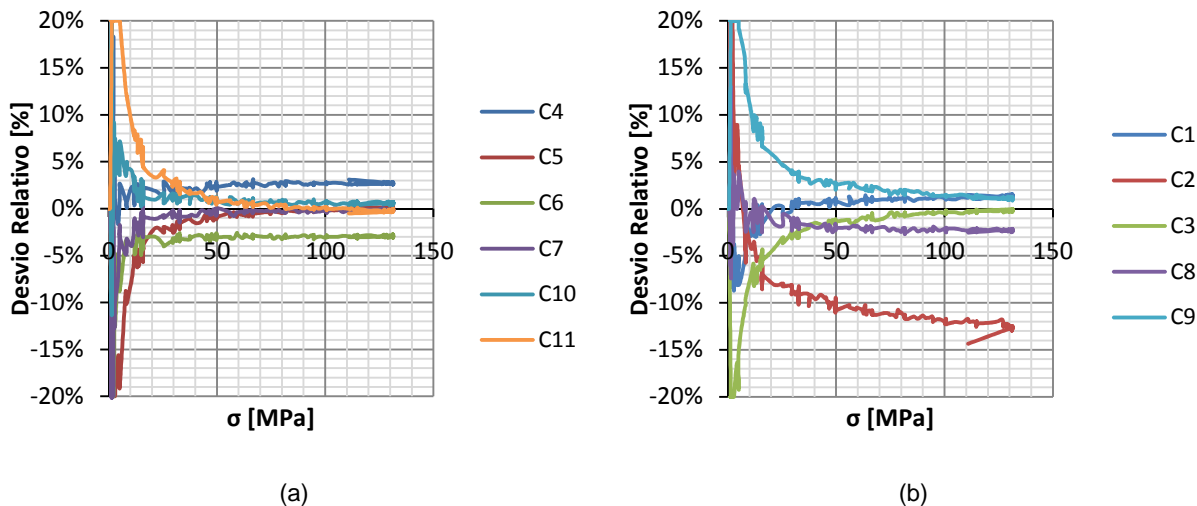


Fig. 4.4 – Desvio dos extensómetros em relação à média: a) banzo inferior; b) banzo superior.

Relativamente à análise seccional da viga, apresenta-se a Fig. 4.5, em que estão envolvidas as Secções S1, S2 e S3. Nestas, à semelhança da análise realizada anteriormente, conclui-se que todos os extensómetros instalados apresentam resultados muito satisfatórios e concordantes entre si.

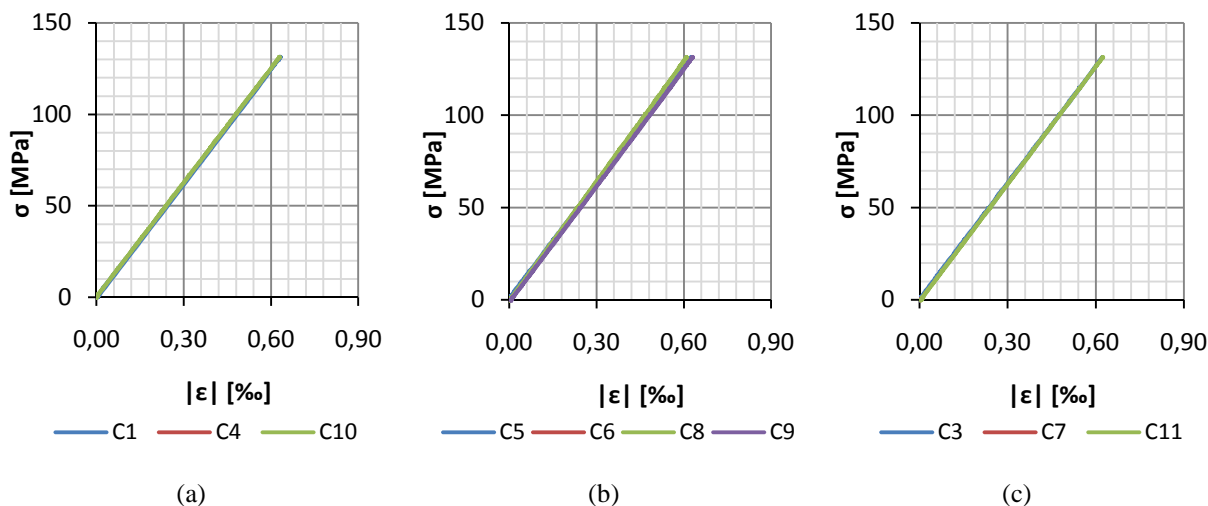


Fig. 4.5 – Estudo dos extensómetros: a) Secção S1, b) Secção S2; c) Secção S3.

Consequentemente, a rede de sensores de deformação axial será definida em função de uma distribuição equilibrada destes pelas diferentes secções, à excepção do extensómetro ligado ao canal 2 (C2). Com vista a cumprir o primeiro objectivo do Ensaio Estático 1, apresenta-se o Quadro 4.1 com o resumo da rede de extensómetros eléctricos instalada após rejeição dos sensores ligados aos canais 2, 7 e 10. Inclui-se também a Fig. 4.6 com a representação transversal da mesma rede.

Quadro 4.1 – Resumo das características da rede de extensómetros eléctricos.

| Canal | Sensor | Secção | Banzo    |
|-------|--------|--------|----------|
| 1     | ERE2   | S1     | Superior |
| 3     | ERE8   | S3     | Superior |
| 4     | ERE4   | S1     | Inferior |
| 5     | ERE12  | S2     | Inferior |
| 6     | ERE10  | S2     | Inferior |
| 8     | ERE7   | S2     | Superior |
| 9     | ERE5   | S2     | Superior |
| 11    | ERE13  | S3     | Inferior |

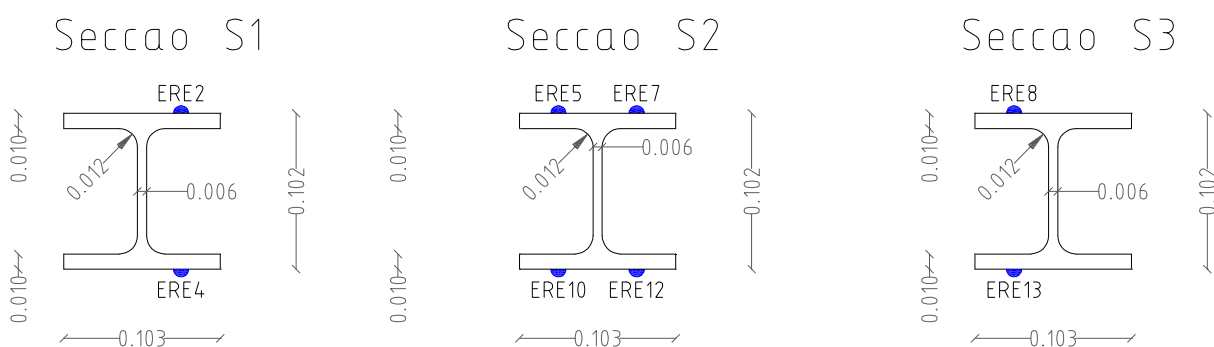


Fig. 4.6 – Localização transversal da rede de extensómetros eléctricos.

Definida a rede de extensómetros eléctricos, é importante ainda aferir sobre o módulo de elasticidade do aço,  $E$ . Pese embora o valor teórico citado por muitos códigos ser 200GPa, aplicando a Lei de Hooke, (4.2) é possível determinar o valor do mesmo. Conhecida a força aplicada à estrutura, e consequentemente o momento flector, é possível relacionar os valores de extensão lidos nos diferentes extensómetros com a tensão normal aplicada, obtida pela expressão (4.3), a qual provém da Teoria de Navier-Bernoulli e será explorada em maior detalhe posteriormente neste trabalho.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.2)$$

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot y \quad (4.3)$$

Da Fig. 4.7 à Fig. 4.10 apresentam-se os diagramas tensão/extensão obtidos para os oito extensómetros eléctricos, bem como a equação que relaciona estas duas grandezas. Conclui-se, que a média de  $E$  de todas as figuras é igual a 210,69GPa e será este o valor a avaliar nos Ensaio Estáticos 2 e 3, dado este afectar as conclusões dos Ensaio Estáticos 4 e 5.

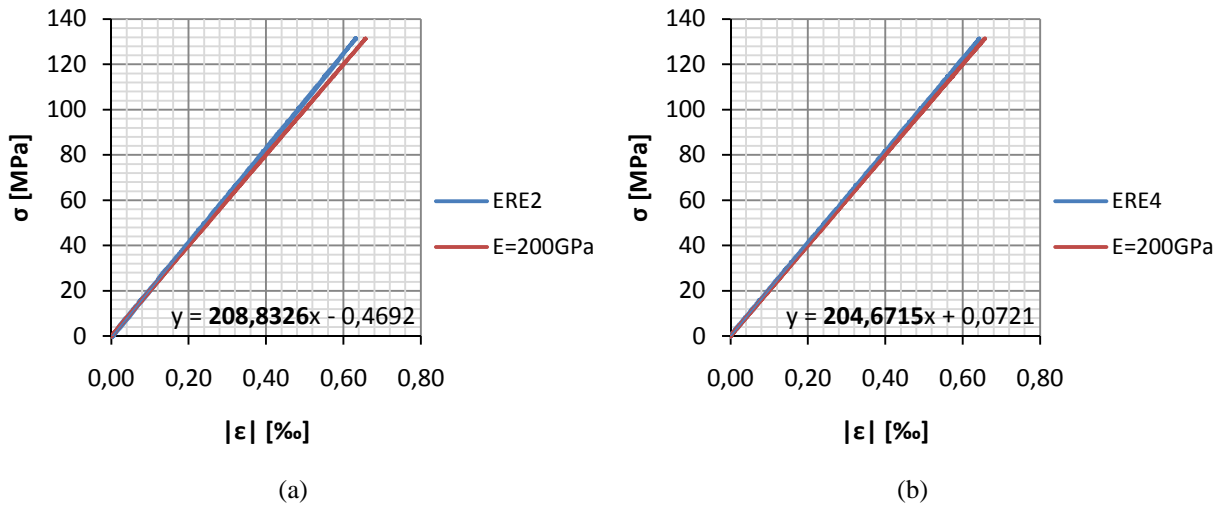


Fig. 4.7 – Relação tensão/extensão: a) ERE2; b) ERE4.

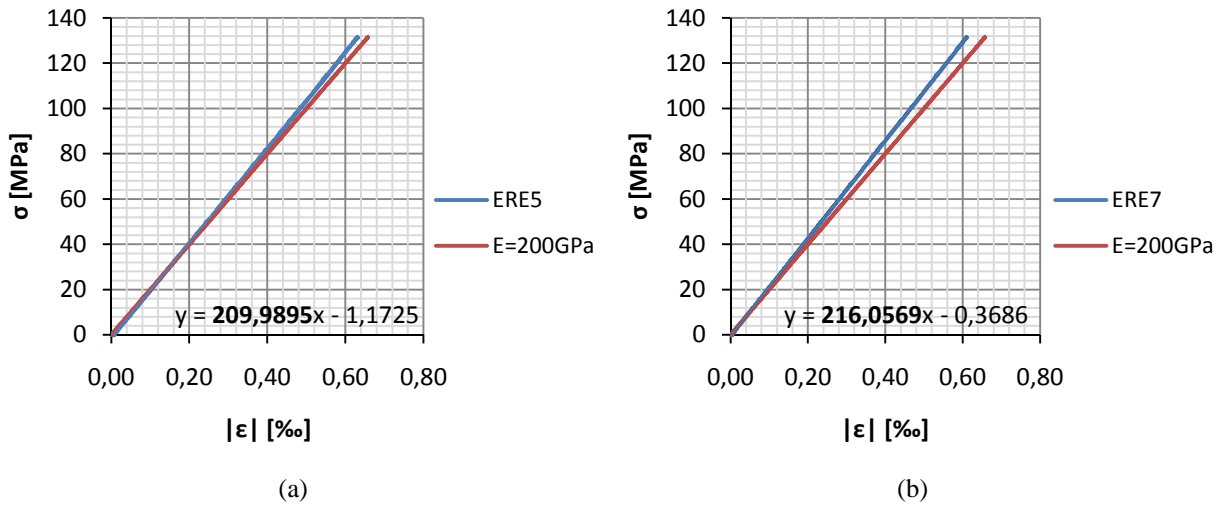


Fig. 4.8 – Relação tensão/extensão: a) ERE5; b) ERE7.

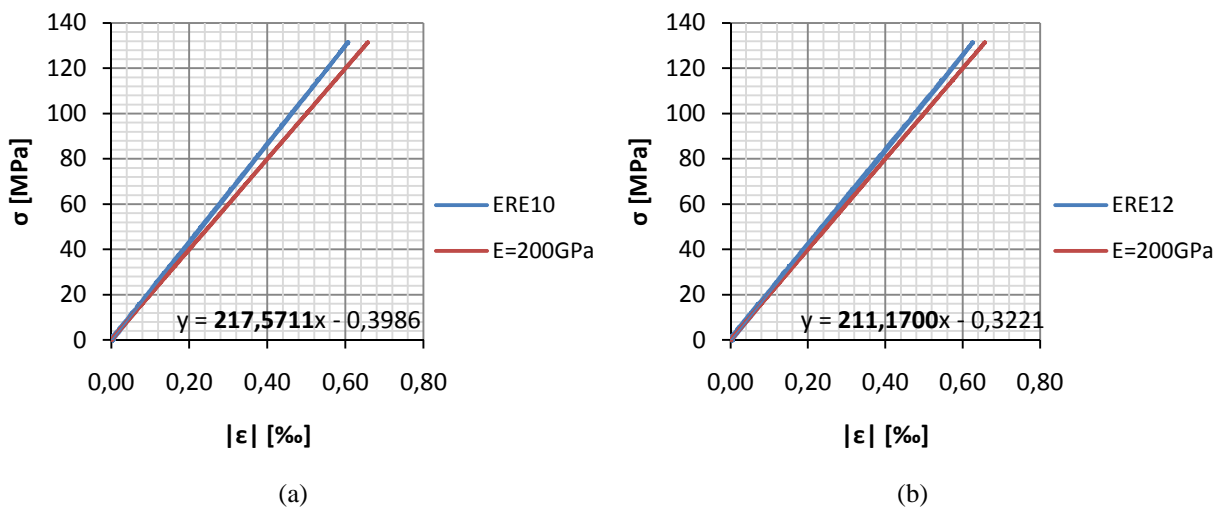


Fig. 4.9 – Relação tensão/extensão: a) ERE10; b) ERE12.

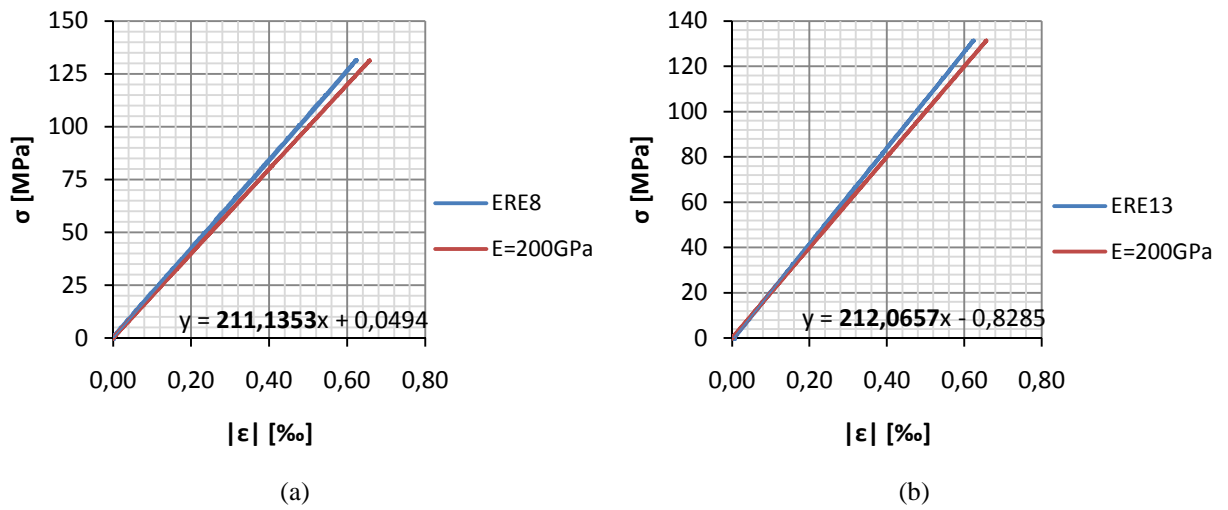


Fig. 4.10 – Relação tensão/extensão ERE8 e ERE13.

### 4.3. ENSAIO ESTÁTICO 2

O Ensaio Estático 2 é o primeiro ensaio constituído por três ciclos de carga/descarga, conforme descrito no subcapítulo 3.4 e representado na Fig. 4.11. Dado o sistema de carregamento utilizado ser manual, não é possível neste tipo de procedimento adquirir sinal aquando da descarga, uma vez que a frequência de aquisição do *DataTaker800* é inferior àquela com que a viga é descarregada. Relativamente ao decréscimo verificado quando se atinge o valor máximo de carga, este deve-se ao facto do actuador de pressão utilizado apresentar pequenas fugas, as quais tornam impossível manter constante o nível de tensão aplicada. Porém, a diminuição sentida não compromete a análise dos dados obtidos, uma vez que se estudará apenas a fase de carga.

Neste ensaio o objectivo consiste em analisar a rede de extensómetros escolhida e validar o valor obtido para o módulo de elasticidade do aço.

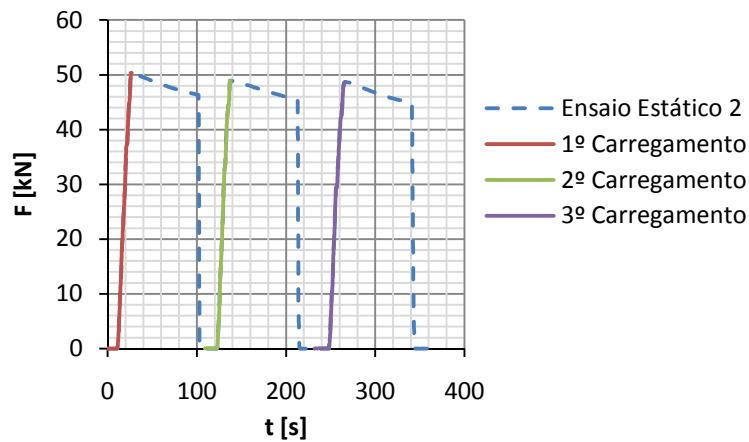


Fig. 4.11 – Ensaio Estático 2.

À semelhança do que foi referido para o primeiro ensaio, as leituras dos extensómetros foram convertidas de ppm, sinal de saída dos sensores, para micro-extensões. Na Fig. 4.12 apresentam-se a azul os dados relativos ao ERE2 e a vermelho os referentes ao ERE4. Neste ponto apresentam-se unicamente as medições de extensões da Secção S1, remetendo-se a análise da Secção S2 e S3 para o Anexo A.

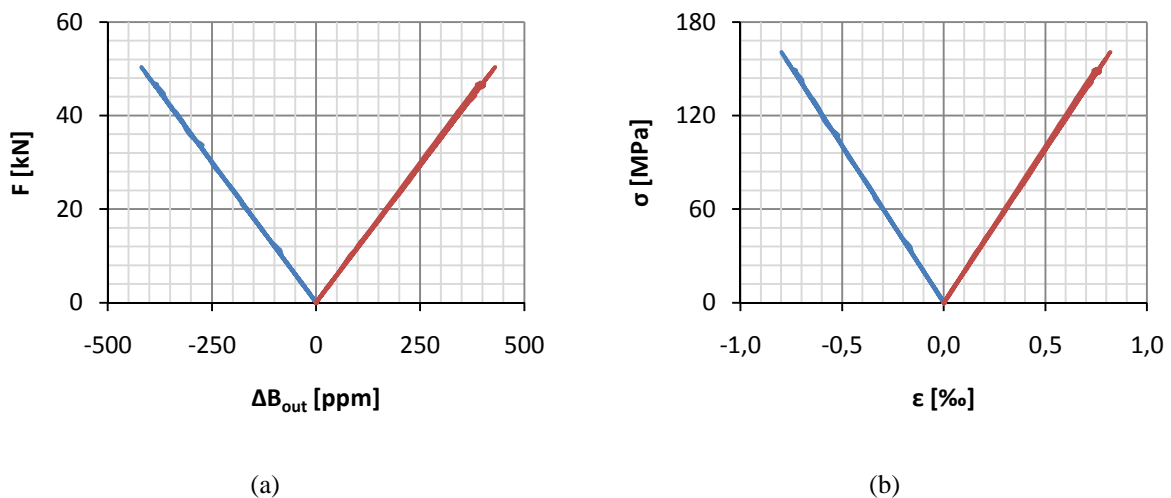


Fig. 4.12 – Medições com extensómetros: a) variação do sinal; b) conversão em extensão.

De forma a aferir sobre a qualidade das leituras dos extensómetros eléctricos ERE2 e ERE4, isolou-se o estudo destes por ciclo de carga. Assim, a cada sensor estão associadas três análises, nas quais se pretende avaliar a diferença entre as extensões lidas nos sensores e aquelas que teoricamente seriam obtidas pela Lei de *Hooke*. De salientar que ao contrário dos gráficos apresentados no ponto anterior, a curva de extensões teóricas será obtida com base num Módulo de *Young* de 210,69GPa e será este o valor em relação ao qual se estudarão eventuais desvios.

Analisando a Fig. 4.13, conclui-se que o desvio relativo associado ao ERE2 é de cerca de 5%, inferior ao ERE4 (cerca de 7%). Este desvio em relação aos valores esperados é significativo, o que sugere que o valor estimado no Ensaio Estático 1 poderá ser aperfeiçoado.

No Quadro 4.2 apresenta-se o resumo dos valores de Módulo de *Young* determinado com base nos resultados dos três carregamentos nos extensómetros ERE2 e ERE4. Nesta secção S1 o módulo de elasticidade final obtido foi de 198,53GPa, tendo este sido calculado como a média dos valores médios obtidos para os sensores ERE2 e ERE4, o que implica uma redução do valor inicialmente estimado da ordem dos 5,8%.

Quadro 4.2 – Resumo módulos de elasticidade, Secção S1.

| Sensor | Carregamento    | E [GPa] |
|--------|-----------------|---------|
| ERE2   | 1º Carregamento | 200,88  |
|        | 2º Carregamento | 200,81  |
|        | 3º Carregamento | 200,68  |
|        | Média           | 200,79  |
| ERE4   | 1º Carregamento | 196,27  |
|        | 2º Carregamento | 196,24  |
|        | 3º Carregamento | 196,30  |
|        | Média           | 196,27  |

Consultando o Anexo A, onde se apresentam os estudos das Secções S2 e S3, conclui-se que o módulo de elasticidade inicialmente calculado no Ensaio Estático 1 não foi bem definido. O valor final determinado como a média das três secções é de 201,79GPa, contudo este terá de ser validado no Ensaio Estático 3.

Mesmo que o procedimento seguido no Ensaio Estático 2 seja mais elaborado comparativamente com o Ensaio Estático 1, uma vez que no segundo ensaio se submeteu a viga a um ensaio de carga/descarga composto por três ciclos, os resultados obtidos neste ponto podem não ser mais expressivos do seu comportamento. Esta conclusão deve-se ao significativo abaixamento do valor de E, o qual poderá indicar que, à medida que os ciclos foram realizados, a viga não recuperou totalmente as deformações impostas nos carregamentos anteriores, i.e., a existência de fenómenos como atritos entre os diversos componentes que materializam o demonstrador, empenamento das secções, ou mesmo a instalação do sensor conduzir a um comportamento deficiente da interface, poderão ter comprometido os valores de extensão lidos na rede de extensómetros eléctricos.

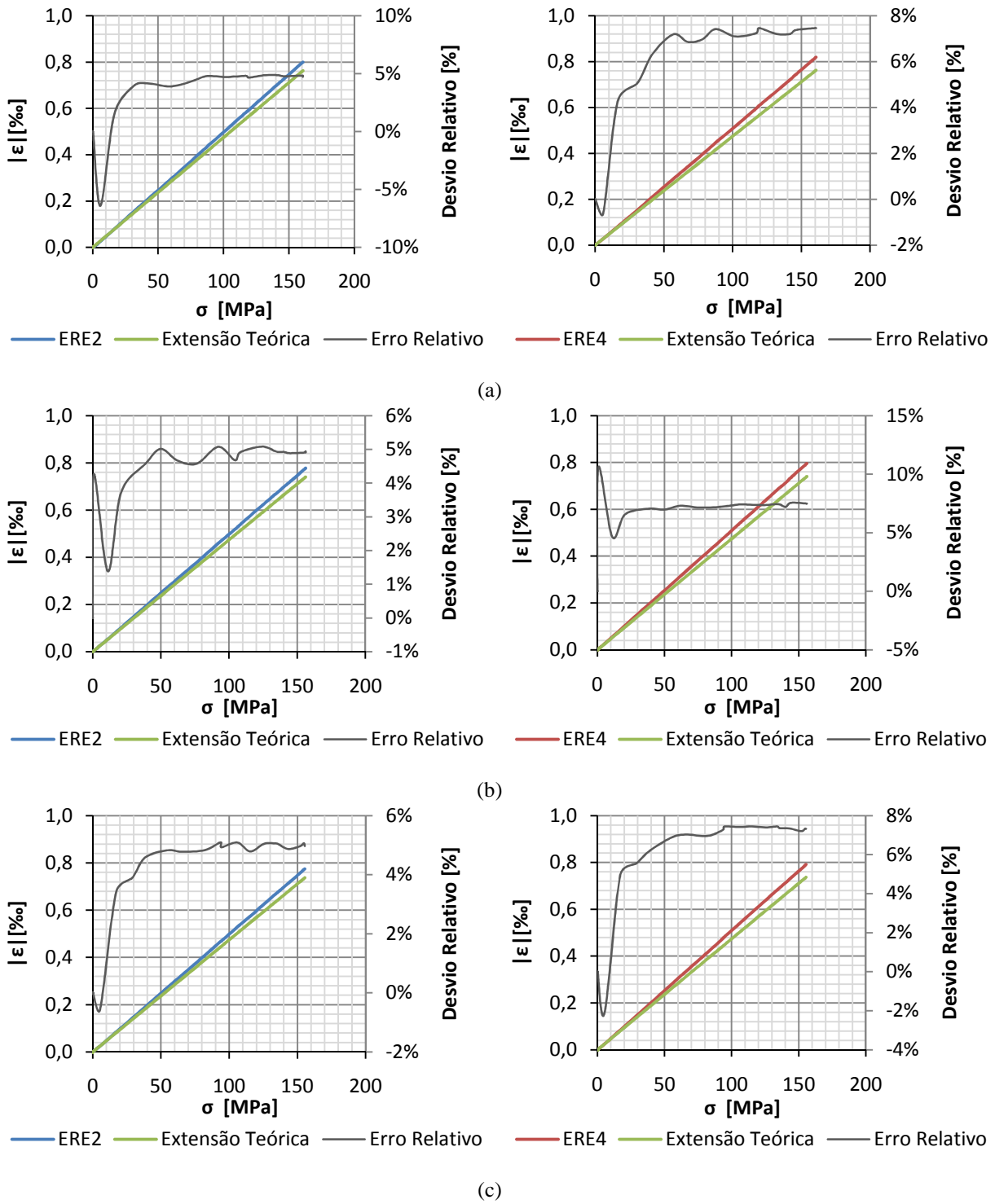


Fig. 4.13 – Estudo Secção S1: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento; c) 3º Carregamento.

#### 4.4. ENSAIO ESTÁTICO 3

O terceiro ensaio estático é constituído por um ciclo de carga com incrementos sucessivos de 10kN, de modo a criar um ensaio por patamares, conforme representado na Fig. 4.14. Dado o sistema de carregamento utilizado ser manual não é possível neste tipo de procedimento aplicar incrementos exactos de 10kN. Pelo mesmo motivo não se assegura que durante o intervalo de tempo durante o qual se esperaria que o nível de tensão permanecesse constante tal ocorra de facto.

Neste ensaio, conforme o procedimento laboratorial anterior, o objectivo consiste em analisar e validar o valor obtido para o módulo de elasticidade do aço no Ensaio Estático 1, o qual segundo o Ensaio Estático 2 se encontra sobrestimado.

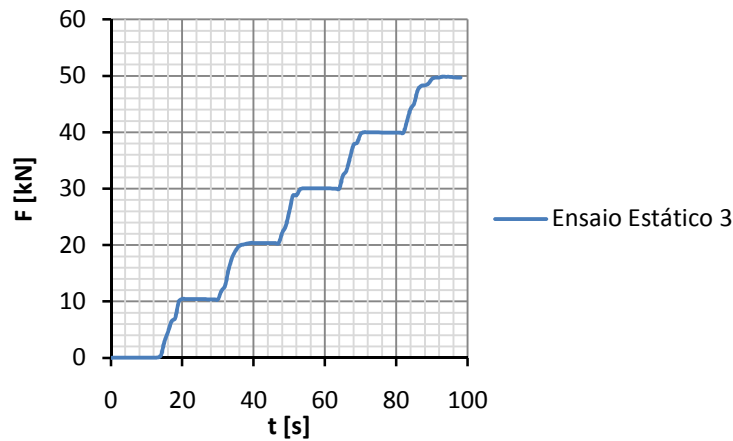


Fig. 4.14 – Ensaio Estático 3.

Na Fig. 4.15, representam-se as medições adquiridas relativas à Secção S1 e a conversão destas para extensões, recorrendo à expressão (4.1). À semelhança do que foi feito anteriormente remete-se o estudo das restantes secções para o Anexo A.

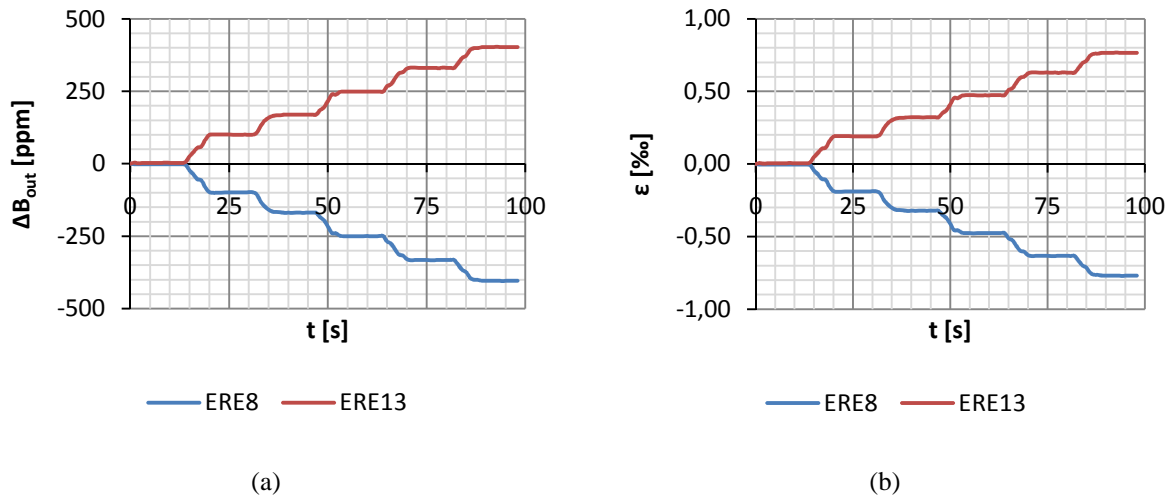


Fig. 4.15 – Medições com extensómetros: a) variação do sinal; b) conversão em extensão.

As medições realizadas com extensómetros eléctricos pretendem aferir o módulo de elasticidade estimado anteriormente no segundo ensaio. Dado estar-se perante um ensaio de carga por patamares, interessa estudar os dados recebidos no sistema de aquisição nos intervalos de tempo em que se procurou que o nível de tensão instalada na viga permanecesse constante. Como consequência, para cada secção existem cinco análises a realizar, relativas aos cinco níveis de carga aplicados.

Neste ponto abordam-se unicamente as extensões lidas nos sensores instalados na Secção S1, e de forma a poder determinar qual o desvio associado a estas por patamar de carga, optou-se por comparar o valor de extensão teórica expectável com a média das leituras realizadas pelos extensómetros.

Nas Fig. 4.16, Fig. 4.17 e Fig. 4.18 apresentam-se os diferentes valores de extensões medidos nos sensores ERE2 e ERE4 e o desvio destes em relação aos valores obtidos pela Lei de *Hooke*, onde é conhecido o Módulo de *Young* teórico e a tensão normal instalada ao nível dos sensores. Constatase que os desvios relativos são significativos, o que corrobora as conclusões retiradas no Ensaio 2. De acordo com a informação exposta, conclui-se que o desvio relativo entre os valores lidos e os teóricos correspondem a um intervalo de 4% a 8%. Contudo, esta gama de valores despreza os desvios obtidos para o primeiro patamar de carga, o qual é substancialmente maior pelas razões já expostas no Ensaio Estático 1.

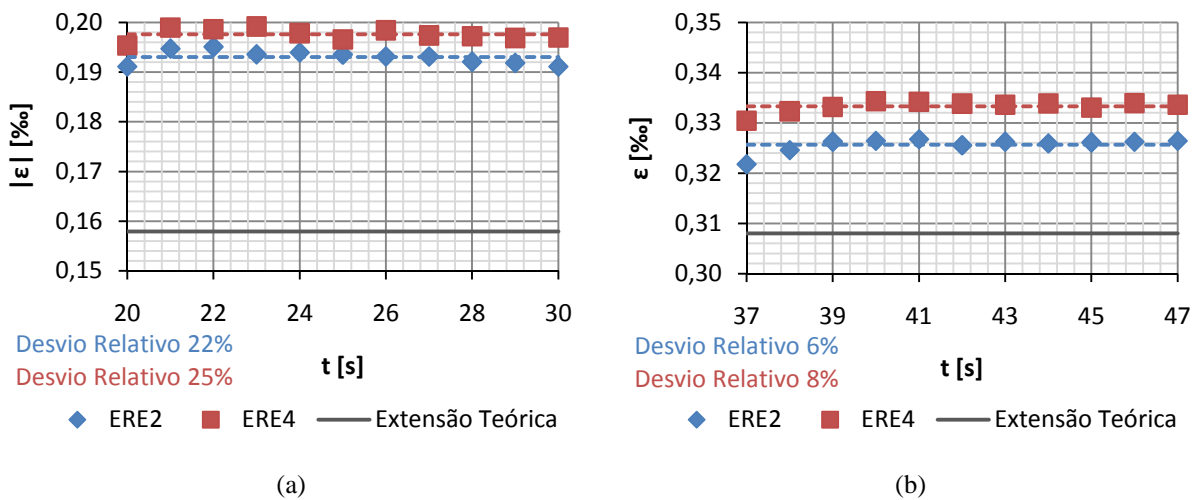


Fig. 4.16 – Estudo Secção S1: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN.

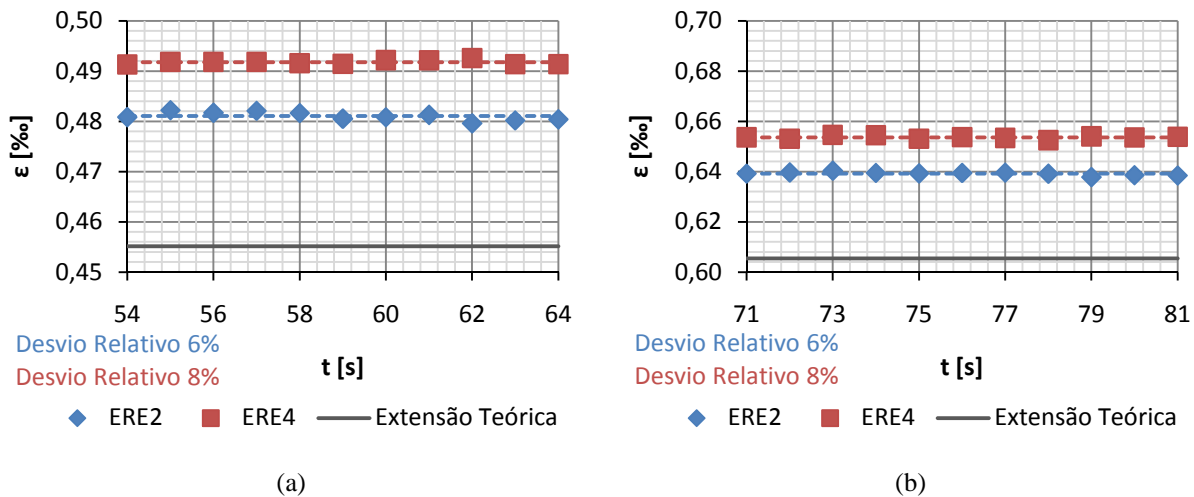


Fig. 4.17 – Estudo Secção S1: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN.

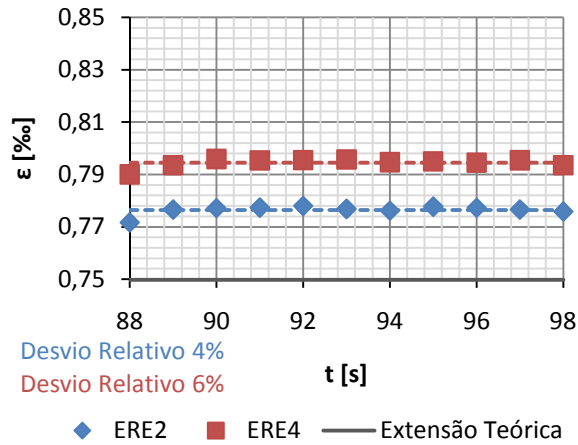


Fig. 4.18 – Estudo Secção S1, Patamar 50kN.

Com base no valor de força aplicado à estrutura por patamar é possível determinar o valor de tensão normal, o qual, relacionado com o valor médio de extensões obtido para cada nível de carga, permite aproximar um comportamento linear da estrutura e assim estimar o valor do módulo de elasticidade, Quadro 4.3 e Fig. 4.19.

Quadro 4.3 – Extensões médias por patamar e sensor, Secção S1.

| Patamar | $F_{real}$ [kN] | $\sigma$ [MPa] | Sensor | $\bar{\epsilon}$ [%] |
|---------|-----------------|----------------|--------|----------------------|
| 10kN    | 10,43           | 33,27          | ERE2   | 0,193                |
|         |                 |                | ERE4   | 0,198                |
| 20kN    | 20,33           | 64,89          | ERE2   | 0,326                |
|         |                 |                | ERE4   | 0,333                |
| 30kN    | 30,05           | 95,89          | ERE2   | 0,481                |
|         |                 |                | ERE4   | 0,492                |
| 40kN    | 39,97           | 127,55         | ERE2   | 0,639                |
|         |                 |                | ERE4   | 0,654                |
| 50kN    | 49,50           | 157,98         | ERE2   | 0,776                |
|         |                 |                | ERE4   | 0,794                |

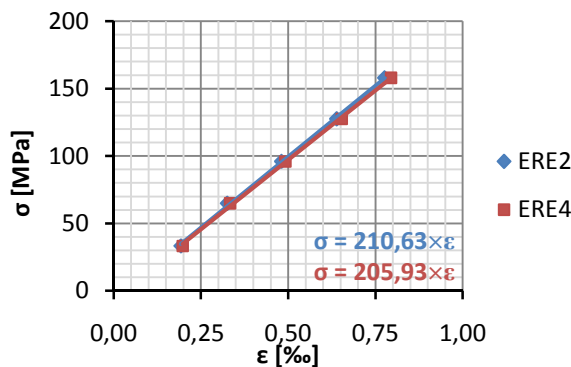


Fig. 4.19 – Comportamento linear aproximado, Secção S1.

Conclui-se com base na informação recolhida da rede de sensores instalada na Secção S1, que o módulo de elasticidade nesta é 208,28GPa, média dos dois valores apresentados na Fig. 4.19. Adoptando a mesma filosofia da secção S1, do estudo das secções S1 e S2 apresentado no Anexo A, verifica-se que o valor final de E a considerar é 212,02GPa, sendo este a média dos valores obtidos por secção instrumentada.

#### 4.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS RELATIVOS AOS ENSAIOS ESTÁTICOS 1, 2 E 3

Neste ponto do trabalho procura-se resumir as conclusões retiradas dos três ensaios estáticos anteriores, no que diz respeito aos valores de módulo de elasticidade obtidos e determinar o valor a utilizar em ensaios futuros com a restante rede de sensores instalada. Deste modo, para uma mais clara visualização dos valores obtidos, inclui-se o Quadro 4.4, no qual também se insere o desvio relativo entre o valor de E determinado em cada ensaio e a média destes.

Quadro 4.4 – Valores de E nos diferentes ensaios estáticos.

| Ensaio | E [GPa] | Desvio Relativo [%] |
|--------|---------|---------------------|
| 1      | 210,69  | 1,2                 |
| 2      | 201,79  | -3,1                |
| 3      | 212,02  | 1,9                 |
| Média  | 208,17  |                     |

Pese embora o valor de E do Ensaio 2 ser aproximadamente 4% a 5% mais baixo quando comparado com os resultados dos Ensaios 1 e 3, este será na mesma contabilizado para futuros cálculos. O valor final do módulo de elasticidade do aço resulta de uma média aritmética destes três valores e é igual a 208,17GPa, o qual é apenas 1,2% mais baixo do valor inicialmente estimado no Ensaio 1. Este valor encontra-se dentro do intervalo 195-210GPa, definido na bibliografia para o Módulo de *Young* do aço

#### 4.6. ENSAIO ESTÁTICO 4

O Ensaio Estático 4, Fig. 4.20, é constituído por três ciclos de carga/descarga em que a rede de sensores inclui extensómetros eléctricos, inclinómetros e sensores medidores de deslocamentos, LVDTs. É assim objectivo deste ensaio estático introduzir os dois últimos tipos de sensores referidos do ponto de vista prático, ou seja, expor como obter informação de engenharia civil recorrendo a estes equipamentos. Para tal, avaliam-se as rotações ao nível dos apoios e as flechas a meio vão, comparando os valores conseguidos em laboratório com os propostos pela Teoria das Peças Lineares.

As informações recolhidas com a rede de extensómetros serão igualmente estudadas, contudo com menos enfoque na questão do módulo de elasticidade da estrutura e do desvio relativo associado às leituras. Procurar-se-á estimar a distribuição de extensões ao longo das Secções S1, S2 e S3 e discutir os valores obtidos.

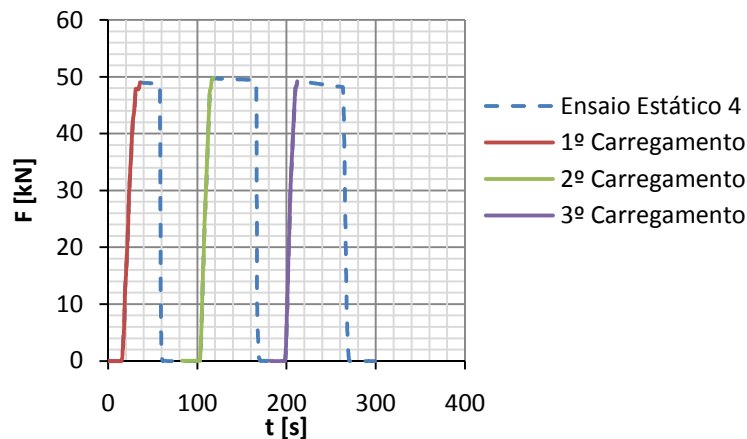


Fig. 4.20 – Ensaio Estático 4.

##### 4.6.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS

Uma vez mais a transformação do sinal de saída dos extensómetros ligados em circuito tipo ponte de *Wheatstone* em *microstrain* é realizada recorrendo à expressão (4.1). Os resultados da medição da variação desse sinal de saída e da correspondência respectiva estão presentes na Fig. 4.21, sendo que nesta apenas se representam os sensores ERE2, a azul, e ERE4, a vermelho, referentes à secção S1.

Novamente remetem-se para o Anexo A as medições realizadas nas Secções S2 e S3.

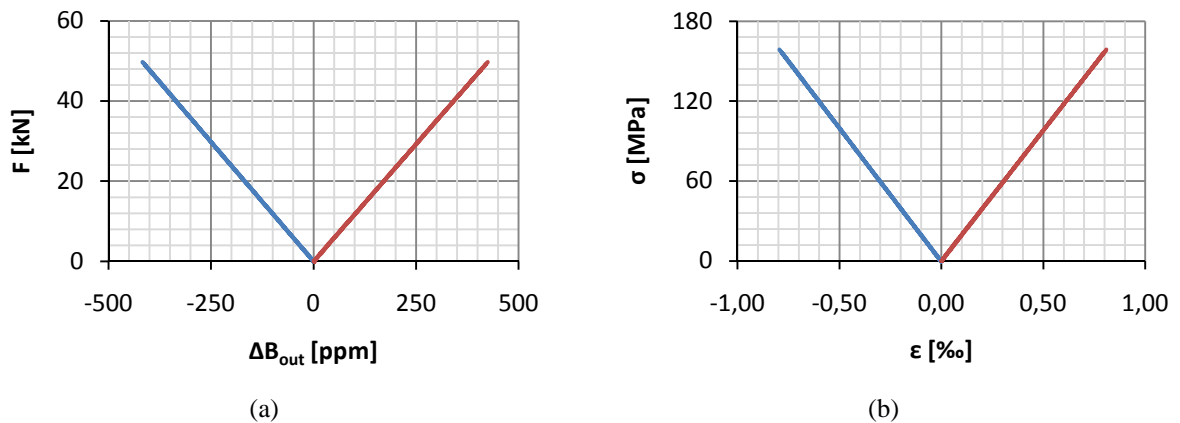


Fig. 4.21 – Medições com extensómetros: a) sinal de saída; b) conversão em extensão.

Adoptando a metodologia aplicada noutras análises de extensões, o estudo das extensões neste ensaio iniciou-se pela comparação destas com os valores teóricos retirados da Lei de *Hooke*, Fig. 4.22.

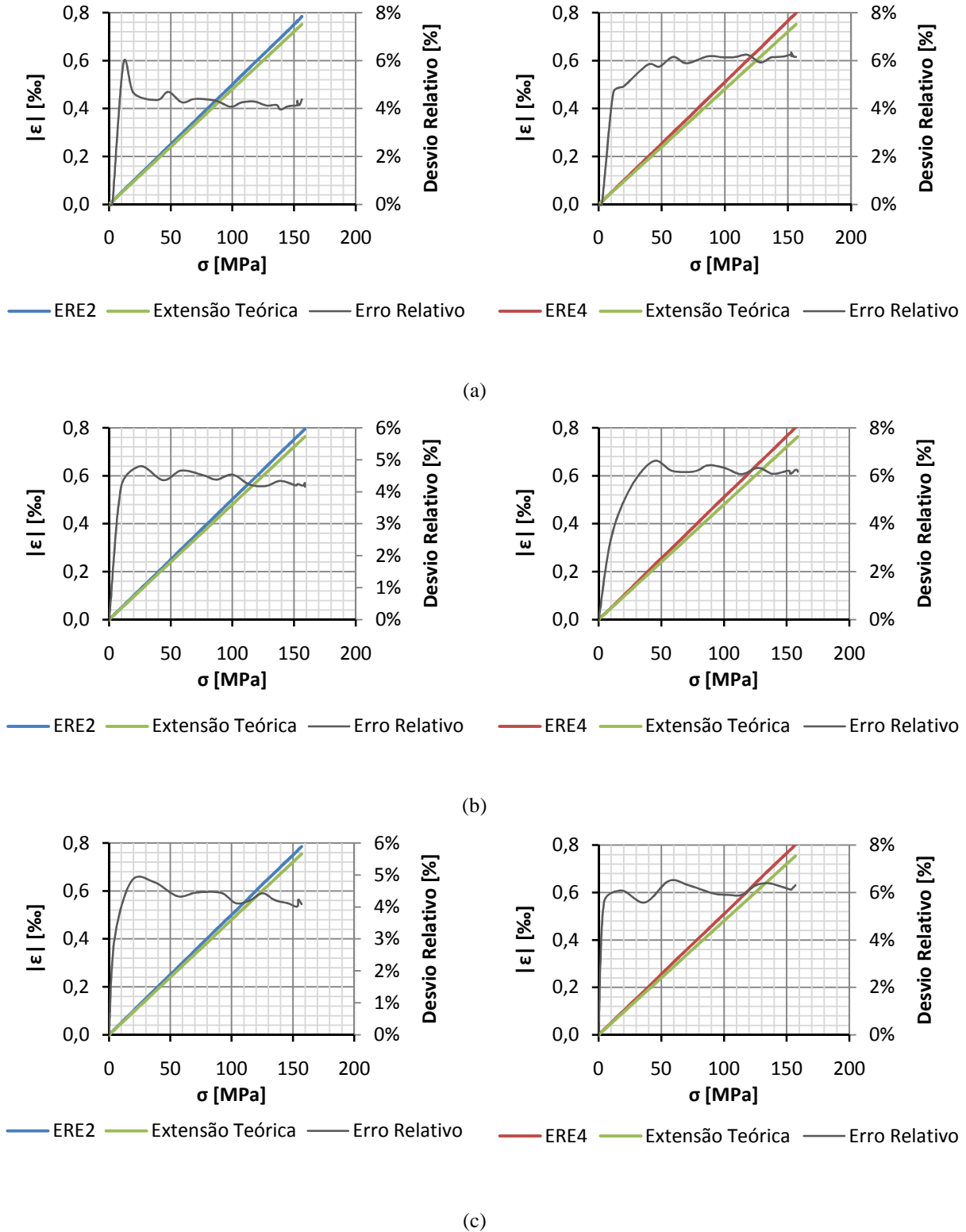


Fig. 4.22 – Estudo da Secção S1: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento; c) 3º Carregamento.

Com base na informação da Fig. 4.22 e do Anexo A são conhecidas as extensões ao longo do desenvolvimento longitudinal da viga, bem como na direcção perpendicular ao eixo desta. O Quadro 4.5 resume os valores de extensão obtidos nos diversos carregamentos para as três secções observadas, bem como aqueles que se obteriam com uma carga exacta de 50kN,  $\varepsilon_{50}$ , e a média dos mesmos,  $\overline{\varepsilon}_{50}$ . Nesta incluem-se também os desvios de cada sensor em relação ao valor teórico de 0,767‰.

Na Fig. 4.23 representa-se esquematicamente a distribuição de extensões pelas três secções instrumentadas. De salientar que o facto de se terem seleccionado sensores em abas diferentes nas Secções S1 e S3 se destinou a completar os diagramas de extensões nestas mesmas.

Quadro 4.5 – Resumo de extensões obtidas nos Extensómetros Eléctricos e desvios relativos.

| Secção | Sensor | Carregamento | $\varepsilon$ [‰] | $\varepsilon_{50}$ [‰] | $\overline{\varepsilon}_{50}$ [‰] | Desvio Relativo [%] |
|--------|--------|--------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| S1     | ERE2   | 1º           | 0,784             | 0,800                  |                                   |                     |
|        |        | 2º           | 0,795             | 0,799                  | 0,799                             | 4,2                 |
|        |        | 3º           | 0,785             | 0,798                  |                                   |                     |
|        | ERE4   | 1º           | 0,797             | 0,813                  |                                   |                     |
|        |        | 2º           | 0,810             | 0,814                  | 0,814                             | 6,2                 |
|        |        | 3º           | 0,802             | 0,815                  |                                   |                     |
| S2     | ERE5   | 1º           | 0,772             | 0,788                  |                                   |                     |
|        |        | 2º           | 0,784             | 0,788                  | 0,788                             | 2,8                 |
|        |        | 3º           | 0,777             | 0,790                  |                                   |                     |
|        | ERE7   | 1º           | 0,756             | 0,772                  |                                   |                     |
|        |        | 2º           | 0,756             | 0,772                  | 0,772                             | 0,7                 |
|        |        | 3º           | 0,757             | 0,772                  |                                   |                     |
|        | ERE10  | 1º           | 0,759             | 0,775                  |                                   |                     |
|        |        | 2º           | 0,771             | 0,775                  | 0,775                             | 1,1                 |
|        |        | 3º           | 0,763             | 0,775                  |                                   |                     |
| ERE12  | 1º     | 0,782        | 0,798             |                        |                                   |                     |
|        | 2º     | 0,795        | 0,799             | 0,798                  | 4,1                               |                     |
|        | 3º     | 0,785        | 0,798             |                        |                                   |                     |
| S3     | ERE8   | 1º           | 0,784             | 0,800                  |                                   |                     |
|        |        | 2º           | 0,796             | 0,800                  | 0,800                             | 4,4                 |
|        |        | 3º           | 0,788             | 0,801                  |                                   |                     |
|        | ERE13  | 1º           | 0,797             | 0,813                  |                                   |                     |
|        |        | 2º           | 0,810             | 0,814                  | 0,814                             | 6,2                 |
|        |        | 3º           | 0,802             | 0,815                  |                                   |                     |

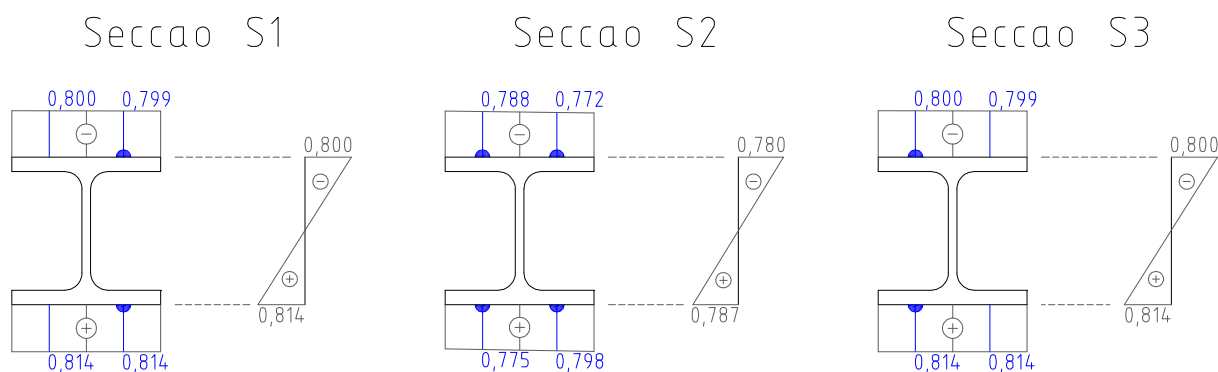


Fig. 4.23 – Diagramas de extensões finais [%].

### Avaliação de Extensões pela Teoria das Peças Lineares

Segundo as hipóteses fundamentais da Resistência de Materiais, o material constituinte de uma estrutura é contínuo, homogéneo e isotrópico, isto é, apresenta as mesmas propriedades mecânicas em qualquer ponto e estas são iguais em todas as direcções em torno desse mesmo ponto (Timoshenko, 1994). Por outro lado, no âmbito das deformações é usual considerar-se que estas se relacionam em todos os seus pontos com as tensões, em termos lineares e homogéneos pelas chamadas equações constitutivas, como é o caso da Lei de *Hooke*. Pese embora se tenham apresentado estudos de módulo de elasticidade em que este variava ao longo da peça, afirmar que a estrutura em questão é constituída por um material homogéneo não é errado, dado essa variação não ser significativa. Apontam-se como eventuais causas as constantes de calibração dos sensores não se encontrarem perfeitamente definidas ou as técnicas de colagem utilizadas introduzirem pequenas variações nas leituras.

Existem ainda dois princípios fundamentais que sustentam a Teoria das Peças Lineares, são eles o Princípio de *Saint-Venant* e a Hipótese de *Navier-Bernoulli*. O primeiro afirma que quando uma secção de uma peça está suficientemente afastada dos pontos de aplicação das forças exteriores, o estado de tensão nessa secção não depende da forma como essas forças estão aplicadas mas sim da resultante (Beer, 1995). Isto é, se forem aplicadas cargas concentradas, como no esquema de carregamento utilizado nos procedimentos laboratoriais, os elementos na vizinhança imediata dos pontos de aplicação das cargas estão submetidos a tensões muito elevadas quando comparados com outros que, dada a sua localização, praticamente não são afectados. Assim, as maiores tensões e deformações ocorrem perto dos pontos de aplicação das cargas e, à medida que se consideram secções mais afastadas, nota-se uma progressiva igualização das deformações envolvidas, isto é, uma distribuição de deformações e tensões quase uniforme na secção transversal. Consequentemente, compreende-se que a Teoria das Peças Lineares, onde a linha do eixo médio de uma barra representa essa mesma barra, esta questão não se coloca, daí os valores teóricos de extensões nas Secções S1, S2 e S3 serem iguais.

De facto, com base nos resultados expostos na Fig. 4.23 verifica-se que as extensões máximas verificadas nas Secções S1 e S3 são superiores às da Secção S2, uma vez que as duas primeiras se encontram nas imediações dos pontos de carregamento.

Relativamente à Hipótese de *Navier-Bernoulli*, esta defende que uma secção plana de uma peça linear não deformada se mantém plana após deformação, de modo a que o cálculo de tensões seja simplificado, o que na realidade só é aceitável quando as dimensões longitudinais da estrutura são bastante superiores às transversais. Esse cálculo de tensões necessita que se adopte um sistema de

coordenadas adequado para descrever a geometria da peça, sendo usualmente definidas as coordenadas  $(x,y,z)$ , onde  $x$  é a distância ao longo do eixo e  $(y,z)$  dizem respeito à definição da secção transversal.

No caso geral de flexão composta desviada, a tensão é dada pela expressão (4.4), onde  $I_y$  e  $I_z$  representam os momentos de inércia segundo os eixos  $y$  e  $z$ ,  $I_{yz}$  é o produto de inércia e  $M_y$  e  $M_z$  são os momentos flectores segundo as direcções  $y$  e  $z$ . No presente caso  $M_z$  e o esforço axial,  $N_x$ , são nulos e  $M_y$  varia segundo  $x$  conforme representado no ponto 3.2.1:

$$\sigma(x,y,z) = \frac{N_x(x)}{A} + \frac{z \cdot I_z - y \cdot I_{yz}}{I_z \cdot I_y - I_{yz}^2} \cdot M_y(x) - \frac{y \cdot I_y - z \cdot I_{yz}}{I_z \cdot I_y - I_{yz}^2} \cdot M_z(x) \quad (4.4)$$

Da estática, caso as direcções dos eixos  $y$  e  $z$  sejam coincidentes com as direcções principais de inércia, o produto de inércia  $I_{yz}$  é nulo. Considerando os esforços actuantes no modelo laboratorial a equação anterior pode simplificar-se na expressão (4.5), já aplicada anteriormente neste trabalho:

$$\sigma = \frac{M_y(x)}{I_y} \cdot z \quad (4.5)$$

Tomando como  $z$  metade da altura da secção, os valores teóricos de tensão normal nas fibras superior e inferior seriam iguais segundo *Navier-Bernoulli*. Tal resultaria em extensões nos banzos também iguais em valor absoluto. Para um valor de carga de 50kN, e considerando as propriedades geométricas do perfil utilizado, aquelas seriam de 0,767%.

De facto na Teoria das Peças Lineares, a viga estaria apoiada sobre o seu eixo, o que resultaria em distâncias iguais do banzo superior e inferior ao centro de gravidade do perfil, dado a secção rodar livremente em torno do eixo  $y$ . Contudo, a Fig. 4.23 demonstra que na realidade se obtêm maiores extensões de tracção do que de compressão, o que pode ser explicado por imperfeições geométricas que resultam numa posição do eixo neutro tal que conduz a distâncias diferentes entre o centro de gravidade da viga e os banzos da mesma. Relativamente à Secção S2 a diferença de extensões nas abas do mesmo banzo deve-se à eventual inclinação do eixo neutro da viga, o qual não seria perfeitamente paralelo aos banzos. Na origem deste facto podem estar esforços de torção causados por má centragem transversal da carga. De salientar que a diferença entre a extensão de compressão e de tracção nesta secção é menor do que nas Secções S1 e S3.

#### 4.6.2. MEDIÇÕES DE ROTAÇÕES COM INCLINÓMETROS

Nos pontos anteriores explorou-se a interpretação da informação recebida na rede de extensómetros eléctricos, contudo como indicado no Quadro 3.5 a rede de sensores no Ensaio Estático 4 inclui também sensores responsáveis pela medição de rotações, isto é, os inclinómetros. Estes sensores encontram-se colados ao banzo superior da viga nas secções de apoio, uma vez que é aí que as rotações experienciadas pela estrutura face ao carregamento são maiores.

Ao contrário dos extensómetros eléctricos, os inclinómetros apresentam um sinal de saída em corrente eléctrica, cuja gama de variação se encontra entre os 4 e os 20 miliamperes. No ensaio em questão, antes da viga ser solicitada o sinal recebido no sistema de aquisição era da ordem dos 14mA, o que indica que este se encontrava em boas condições de funcionamento. Uma particularidade da aplicação destes sensores reside no facto de estes necessitarem de alimentação externa.

Na Fig. 4.24 mostra-se a variação da intensidade de corrente,  $\Delta I$ , obtida no sistema de aquisição em função da força  $F$  aplicada pelo sistema de carregamento. Inclui-se também a conversão desta variação de sinal em rotação e a sua relação com o momento flector. De referir que a conversão é conseguida através da expressão (4.6), na qual  $k_{incl.}$  assume o valor de 0,1215°/mA e 0,1262°/mA para os

inclinómetros esquerdo e direito, respectivamente. A localização destes sensores foi apresentada no Capítulo 3 na Fig. 3.12. Na Fig. 4.24, e demais não legendadas, a azul representa-se a informação relativa ao inclinómetro localizado sobre o apoio esquerdo e a vermelho os dados adquiridos do inclinómetro colado sobre o apoio direito.

$$\theta = k_{\text{incl.}} \cdot \Delta I \tag{4.6}$$

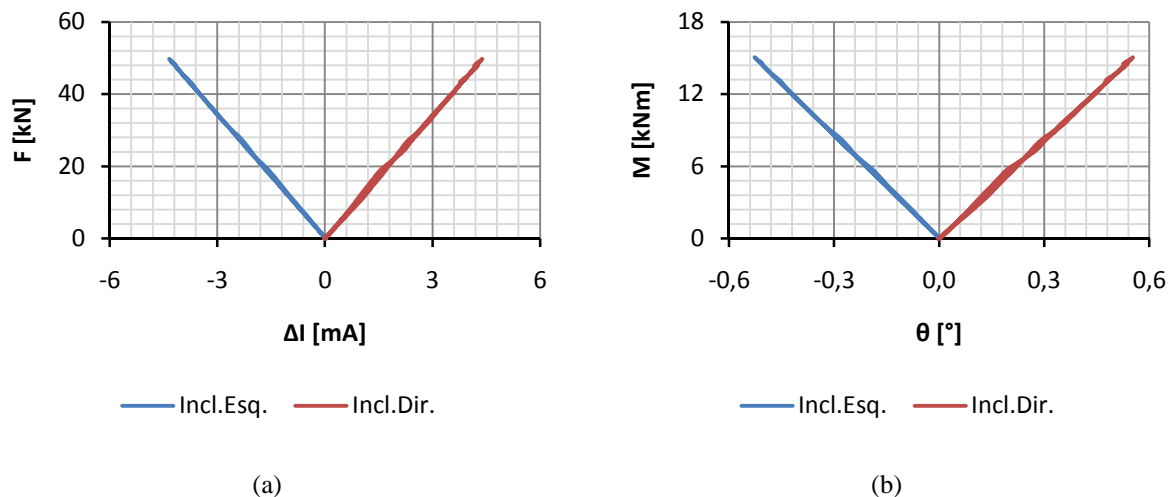


Fig. 4.24 – Medições com inclinómetros: a) variação de corrente; b) conversão em rotação.

De forma a analisar os resultados obtidos nos inclinómetros localizados sobre os apoios, comparar-se-ão os valores medidos nestes para os diferentes ciclos de carga com os valores teóricos de rotações ao nível dos apoios. Contudo, numa primeira fase apresentam-se os gráficos de rotações, em valor absoluto, em função do momento flector a meio vão, de modo a aferir-se sobre a qualidade das medições realizadas nos três ciclos de carga/descarga, Fig. 4.25.

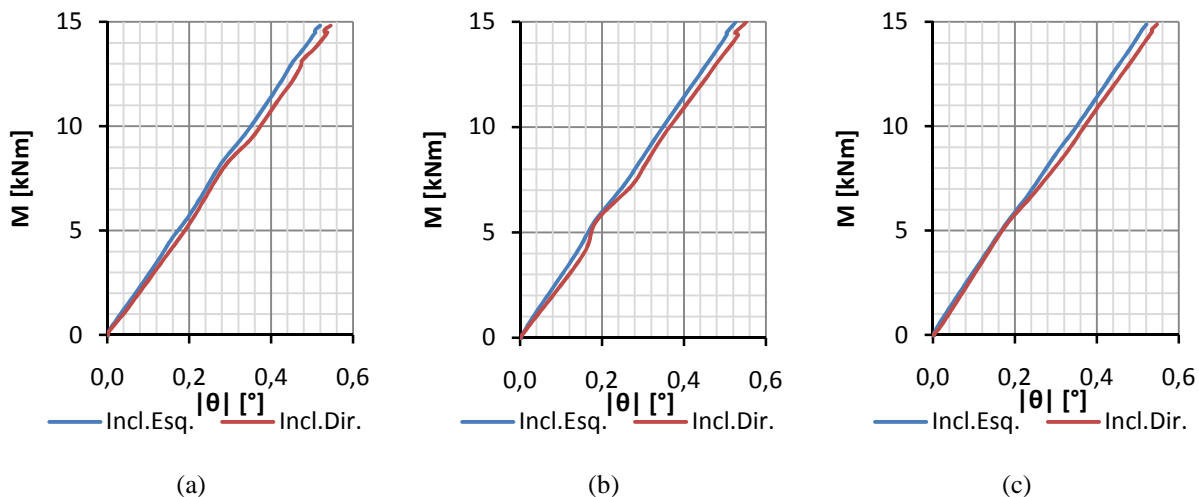


Fig. 4.25 – Comparação de rotação: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento; c) 3º Carregamento.

Da análise da Fig. 4.25 conclui-se que existe uma ligeira diferença entre as rotações experimentadas pelas secções dos apoios esquerdo e direito, a qual é directamente proporcional ao nível de carga aplicada à estrutura. Segundo os dados recebidos, o apoio esquerdo, representado a azul, parece rodar menos para o mesmo momento flector a meio vão do que o apoio da direita, e este comportamento repete-se nos três carregamentos.

Assumindo que as constantes  $k$  dos inclinómetros estão correctas, dadas as suas recentes calibrações, a origem desta situação pode estar na eventual má colagem dos inclinómetros ou má centragem da carga. Do ponto de vista do autor o último motivo assume-se como o mais provável, uma vez que a rigorosa simetria do carregamento é difícil de ser obtida.

Recorrendo à Teoria das Peças Lineares e ao Método da Integração da Elástica é possível determinar o valor teórico de rotação ao nível dos apoios, para assim poder avaliar o desvio entre os valores obtidos em laboratório e estes. O Método da Integração da Elástica é um método bastante utilizado para determinar deslocamentos em estruturas submetidas a esforços de flexão. Entende-se por elástica a curva que define o eixo da peça após a deformação, Fig. 4.26. O que neste ponto se pretende avaliar é a rotação,  $\theta$ , de secções.

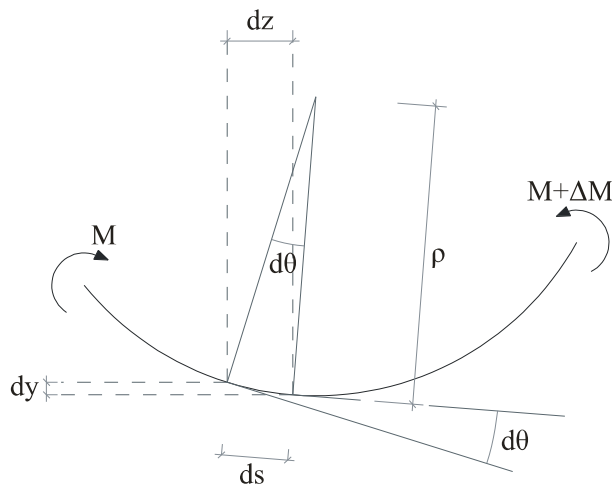


Fig. 4.26 – Deformação provocada por momento flector positivo (Adaptado de Beer, 1995).

Na base deste método os princípios e hipóteses citados anteriormente continuam válidos. Por outro lado, os deslocamentos são calculados com base em análises lineares, isto é, aproxima-se o arco de circunferência, percorrido por um ponto da elástica, à tangente que passa nesse mesmo ponto quando este passa de uma posição inicial não deformada para uma posição final deformada. Partindo deste pressuposto, os deslocamentos são sempre perpendiculares ao eixo da peça na configuração indeformada e a rotação  $\theta$  é igual ao quociente entre esse deslocamento e o raio de curvatura,  $\rho$ . Esta constatação está na base da equação (4.7):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \tag{4.7}$$

No domínio das pequenas deformações obtém-se ainda a expressão (4.8), a qual articulada com a expressão (4.7) origina a equação diferencial da elástica submetida a flexão (4.9):

$$\frac{1}{\rho} \approx \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = y'' \tag{4.8}$$

$$y'' = -\frac{M(z)}{EI} \tag{4.9}$$

Para resolução da equação (4.9) procede-se à sua integração ao longo dos diferentes troços onde a função  $M$  é integrável, sendo que com a primeira integração se obtém a equação das rotações, (4.10). Nesta expressão  $c_1$  é a constante de integração, a qual depende das condições de apoio da estrutura:

$$y' = -\int \frac{M(z)}{EI} dz + c_1 \tag{4.10}$$

Foi referido que neste caso de estudo a função M é constituída por diferentes troços, estando a nomenclatura destes apresentada na Fig. 4.27. De modo a facilitar a interpretação dos raciocínios que se seguem, as equações (4.11) e (4.12) são funções de momento flector relativas ao primeiro e segundo troço, respectivamente:

$$M_1(z) = \frac{M}{a} \cdot z \quad (4.11)$$

$$M_2(z = a) = M \quad (4.12)$$

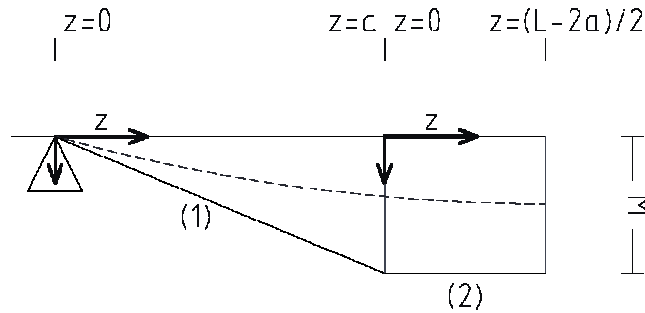


Fig. 4.27 – Convenções para o cálculo da integração da elástica.

Adoptando o raciocínio anteriormente descrito é possível escrever a equação que permite obter a rotação no final do tramo (1), equação (4.13), bem como no final do tramo (2), equação (4.14):

$$y'_1(z = a) = -\frac{1}{EI} \cdot \int_0^a \frac{M}{a} \cdot z dz + c_1 = -\frac{1}{EI} \cdot \frac{M}{2} \cdot a + c_1 \quad (4.13)$$

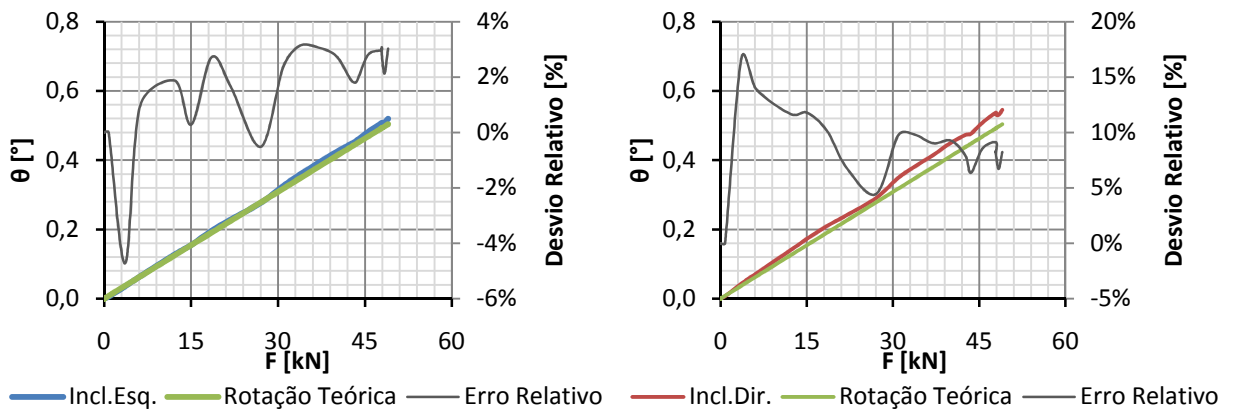
$$y'_2\left(z = \frac{L-2a}{2}\right) = y'_1(z = a) - \frac{1}{EI} \cdot \int_0^{\frac{L-2a}{2}} M dz = y'_1(z = a) - \frac{1}{EI} \cdot M \cdot \frac{L-2a}{2} \quad (4.14)$$

Dado o carregamento ser simétrico, é compreensível que a Secção S2 não rode, uma vez que esta está localizada exactamente a meio vão da viga. Partindo desta condição é possível determinar a constante de integração  $c_1$ , a qual é igual ao valor de rotação teórico com o qual se pretende comparar os dados lidos nos inclinómetros eléctricos instalados no demonstrador:

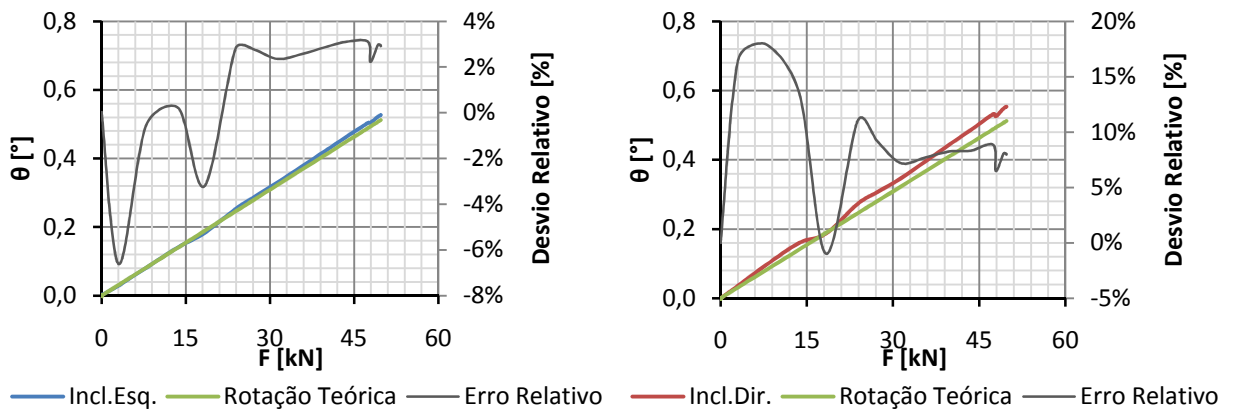
$$-\frac{1}{EI} \cdot \left( \frac{M}{2} \cdot a + \frac{M}{2} \cdot (L-2a) \right) + c_1 = 0 \quad (4.15)$$

$$y'_1(z = 0) = c_1 = \frac{1}{EI} \cdot \frac{M}{2} \cdot (L-a) \quad (4.16)$$

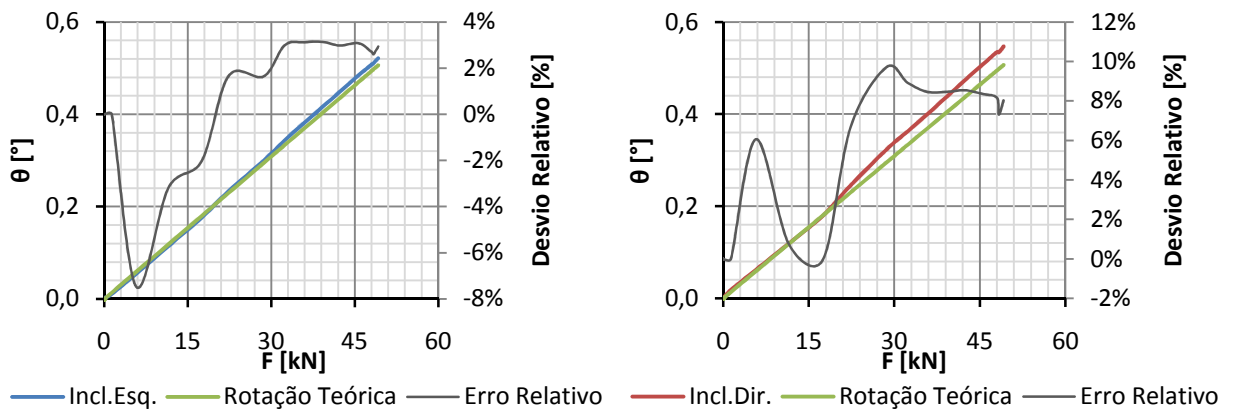
Estão então reunidas as condições para poder avaliar o desempenho dos inclinómetros instalados, desempenho esse que se traduz no cálculo do desvio relativo entre as rotações lidas em laboratório e as calculadas pela expressão (4.16), ver Fig. 4.28.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.28 – Estudo de inclinómetros: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento; c) 3º Carregamento.

Em todos os carregamentos verificou-se que o inclinómetro da esquerda apresentava um desvio bastante inferior ao inclinómetro da direita, tendo o motivo pelo qual ambos não apresentam os mesmos valores sido avançado no início deste tópico. De facto, na fase final do carregamento o desvio do inclinómetro do apoio esquerdo ronda os 2%, independentemente do ciclo de carga em questão, enquanto no inclinómetro direito este se aproxima dos 8%. Pese embora os valores máximos se verifiquem nas fases iniciais de carregamento, pelas razões referidas aquando da análise da rede de extensómetros eléctricos, constata-se que o desvio no inclinómetro da direita atinge picos da ordem dos 10% para valores de carga próximos dos 30kN, picos esses não existentes no inclinómetro esquerdo.

Concluída a análise das rotações dos apoios, pode afirmar-se que a resposta dada pelos sensores cumpriu com os objectivos, uma vez que os valores medidos se encontram relativamente próximos dos teóricos esperados, Quadro 4.6 e Quadro 4.7. Ainda que a centragem da carga e a colagem dos inclinómetros possa em certa parte ter comprometido um maior rigor nos dados adquiridos, o seu fácil manuseamento e instalação no sistema de monitorização e a comodidade com que se tratou a informação por eles transmitida faz com que esta seja uma solução viável e eficaz em monitorização de obras de engenharia civil. Apresenta-se como principal desvantagem a necessidade de ter de alimentar externamente estes sensores.

Quadro 4.6 – Resumo de rotações e desvios associados.

| Carregamento | $F_{real}$ [kN] | $\theta_{teo}$ [°] | $\theta_{esq}$ [°] | Desvio [%] | $\theta_{dir}$ [°] | Desvio [%] |
|--------------|-----------------|--------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|
| 1º           | 48,99           | 0,504              | 0,519              | 3,0        | 0,546              | 8,2        |
| 2º           | 49,76           | 0,512              | 0,527              | 2,9        | 0,553              | 8,0        |
| 3º           | 49,20           | 0,506              | 0,521              | 2,9        | 0,547              | 8,0        |

Quadro 4.7 – Valores médios para força de 50kN.

| F [kN] | $\theta_{teo}$ [°] | $\theta_{esq}$ [°] | $\theta_{dir}$ [°] |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 50     | 0,515              | 0,530              | 0,556              |

#### 4.6.3. MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS COM LVDT

No Quadro 3.5 referiu-se que o objectivo do Ensaio Estático 4 incluía avaliar o desempenho de sensores responsáveis pela medição de deslocamentos. Estes sensores são designados LVDTs, e, para este caso em concreto, foi instalado um a meio vão da viga. O seu princípio de funcionamento foi exposto no Capítulo 2, e, conforme aí referido, o sinal de saída destes é em tensão.

Para traçar os gráficos da Fig. 4.29, isto, é obter o deslocamento da viga a meio vão,  $\delta$ , em função da carga aplicada, é apenas necessário conhecer a constante de calibração,  $k_{LVDT}$ , que relaciona  $\delta$  com a variação de tensão,  $\Delta U$ , lida no sistema de aquisição:

$$\delta = k_{LVDT} \cdot \Delta U \quad (4.17)$$

Para o sensor em questão  $k_{LVDT} = 0,01132 \text{ mm/mV}$ .

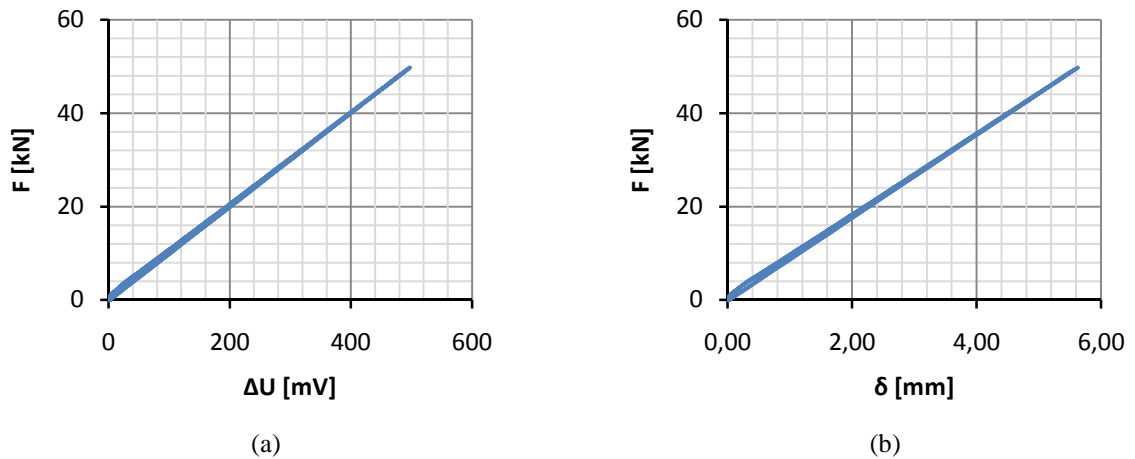


Fig. 4.29 – Medições com LVDT: a) variação de tensão; b) conversão em deslocamentos.

A avaliação do LVDT enquanto medidor de deslocamentos passou por comparar as leituras realizadas por este com o valor de deslocamento a meio vão, obtido pelo Método da Unidade Fictícia de Carga (UFC). Nesta análise comparativa poderia ter sido aplicado o Método da Integração da Elástica, desenvolvendo para tal a equação (4.10), contudo o autor optou aqui por introduzir outra metodologia. Este método permite determinar a projecção do deslocamento numa dada direcção sendo que a sua formulação tem como base o Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV). Este enuncia que é condição necessária e suficiente para que um corpo esteja em equilíbrio elástico, sob a acção de um sistema de forças exteriores, que numa deformação virtual do corpo o trabalho virtual das forças exteriores iguale o trabalho das forças interiores (4.18). Entende-se por forças exteriores as forças de interacção entre o sistema e o exterior, e forças interiores as que se exercem entre as partes constituintes do sistema em estudo, ou seja, são forças de interacção opostas duas a duas (Beer, 1998).

$$W_{ext} = W_{int} \tag{4.18}$$

Para aplicação do PTV ao Método da Unidade Fictícia de Carga assume-se como sistema de forças exteriores a solicitação unitária aplicada na estrutura fictícia e a deformação virtual do corpo, a deformação verificada na estrutura real. A Fig. 4.30 resume as forças e deslocamentos envolvidos, e as expressões (4.19) e (4.20) discriminam os trabalhos das forças externas e internas, respectivamente.

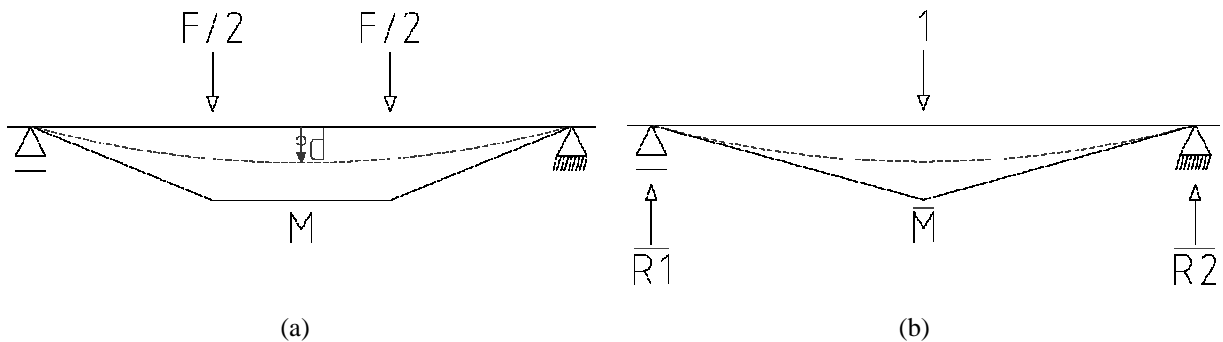


Fig. 4.30 – Unidade fictícia de carga: a) Estrutura real; b) Estrutura fictícia.

$$W_{ext} = \bar{R}_1 \cdot \delta_{\text{apoio esq.}} + 1 \cdot \delta + \bar{R}_2 \cdot \delta_{\text{apoio dir.}} = \delta \tag{4.19}$$

$$W_{int} = \int_0^L \frac{M\bar{M}}{EI} dz + \int_0^L \frac{V\bar{V}}{GA} dz + \int_0^L \frac{T\bar{T}}{G_p} dz = \int_0^L \frac{M\bar{M}}{EI} dz \tag{4.20}$$

Deste modo, conforme enunciado pelo Princípio dos Trabalhos Virtuais, obtém-se a expressão (4.21), a qual permite calcular o deslocamento  $\delta$  pretendido. De salientar que neste caso considerou-se apenas no trabalho interno a parcela relativa ao momento flector, desprezando assim a contribuição do esforço transverso e eventual torção existente por instalação deficiente do demonstrador.

$$\delta = \frac{1}{EI} \cdot \int_0^L M\bar{M}dz \tag{4.21}$$

Para o cálculo dos integrais  $M\bar{M}$  pode aplicar-se o Método do Prof. Bonfim Barreiros. Para o caso em questão pode determinar-se o integral  $M\bar{M}$  conforme apresentado na expressão (4.22), onde  $a$  é igual a 0,605m e  $L$  é igual a 1,800m.

$$\int_0^L M\bar{M}dz = \frac{1}{4} \cdot F \cdot a \cdot L^2 - \frac{11}{12} \cdot F \cdot a^3 \tag{4.22}$$

É assim possível por meio das expressões (4.21) e (4.22) determinar o deslocamento teórico da Secção S2, quando carregada ciclicamente dos 0kN aos 50kN, e comparar esses deslocamentos com os lidos pelo sensor LVDT. Nas Fig. 4.31 e Fig. 4.32 apresentam-se os valores teóricos de  $\delta$  e os valores medidos, bem como o desvio associado a estes últimos.

O que se verifica numa primeira análise é que a ordem de grandeza dos desvios é bastante superior à que tinha vindo a ser determinada em todos os outros tipos de sensores. De facto, nos três carregamentos realizados os desvios chegam a ser superiores a 30%, e o seu valor máximo é praticamente constante a partir dos 20kN de carga aplicada. O deslocamento teórico calculado é bastante inferior ao real, o que indica claramente que a deformação por corte desprezada na equação (4.20) tem um papel fundamental nesta estrutura e não pode ser considerada nula. A título de exemplo o deslocamento de flexão teórico calculado para uma força de 50kN é 4,25mm, enquanto para a mesma força a média de deslocamentos lidos foi de 5,50mm, o que representa um aumento de 29%. Inclui-se no Quadro 4.8, o resumo dos valores obtidos para os diferentes carregamentos e o desvio associado a estes.

Assim, a avaliação do LVDT como sensor responsável por medição de deslocamentos carece da análise do modelo numérico da estrutura, o qual será apresentado no subcapítulo 4.8.

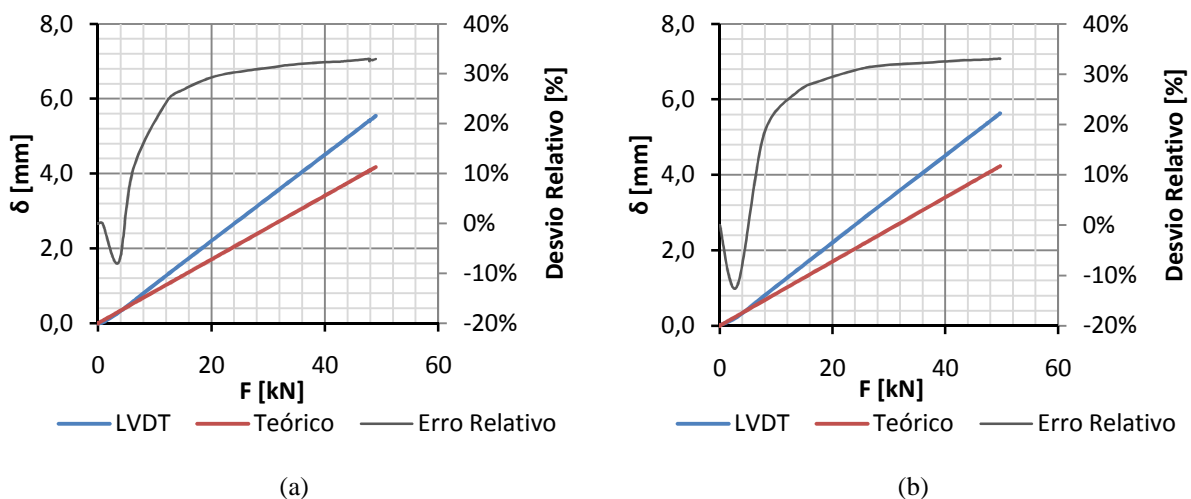


Fig. 4.31 – Estudo de deslocamentos: a) 1º Carregamento; b) 2º Carregamento.

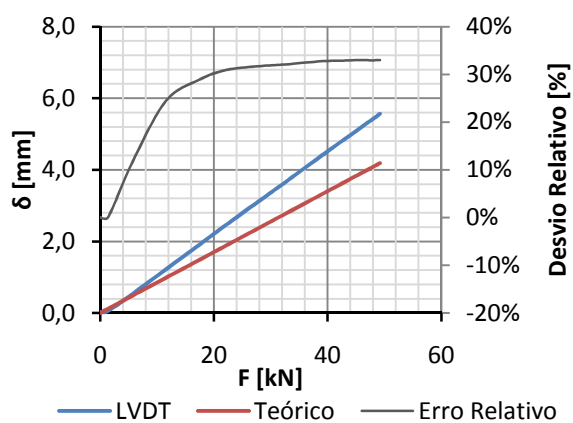


Fig. 4.32 – Estudo de deslocamentos, 3º Carregamento.

Quadro 4.8 – Resumo de deslocamentos e desvios associados.

| Carregamento | $F_{\text{real}}$ [kN] | $\delta_{\text{teo}}$ [mm] | $\delta$ [mm] | Desvio [%] | $\delta_{50}$ [mm] |
|--------------|------------------------|----------------------------|---------------|------------|--------------------|
| 1º           | 48,99                  | 4,17                       | 5,54          | 30,2       | 5,43               |
| 2º           | 49,76                  | 4,23                       | 5,63          | 32,4       | 5,60               |
| 3º           | 49,20                  | 4,19                       | 5,57          | 30,9       | 5,48               |

#### 4.7. ENSAIO ESTÁTICO 5

O quinto ensaio estático, Fig. 4.33, é o primeiro ensaio por patamares, onde a rede de sensores inclui extensómetros eléctricos, inclinómetros e sensores medidores de deslocamentos. Pese embora no ensaio anterior se tenha introduzido o funcionamento e particularidades de inclinómetros e LVDTs, é importante também avaliar o seu funcionamento em situações de carregamento por incrementos sucessivos, como os que serão realizados neste procedimento laboratorial. Assim, é objectivo deste ensaio comparar as rotações ao nível dos apoios e flechas a meio vão com os valores propostos pela bibliografia, os quais foram já apresentados no ponto anterior.

As informações recolhidas com a rede de extensómetros serão igualmente estudadas, procurando-se determinar a distribuição de extensões ao longo das Secções S1, S2 e S3.

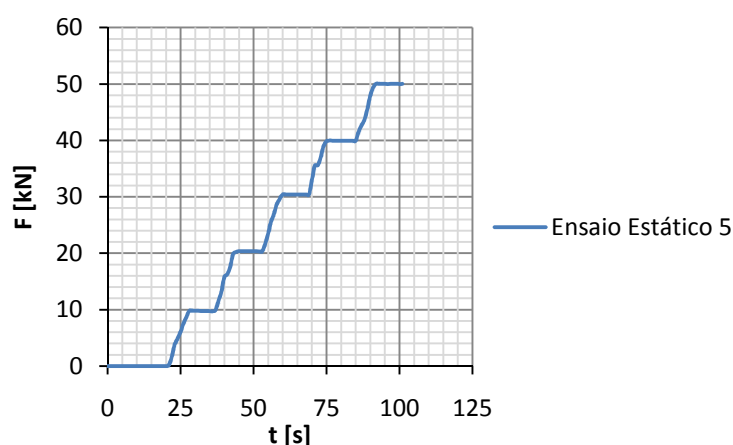


Fig. 4.33 – Ensaio Estático 5.

##### 4.7.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS

Na Fig. 4.34 representam-se os dados recebidos no sistema de aquisição DT800 relativos à Secção S1, sendo que o extensómetro de resistência eléctrica 2 está representado a azul e o 4 a vermelho. Inclui-se também a conversão destes para extensões, recorrendo à equação (4.1). À semelhança do que foi feito anteriormente remete-se o estudo das restantes secções para o Anexo A.

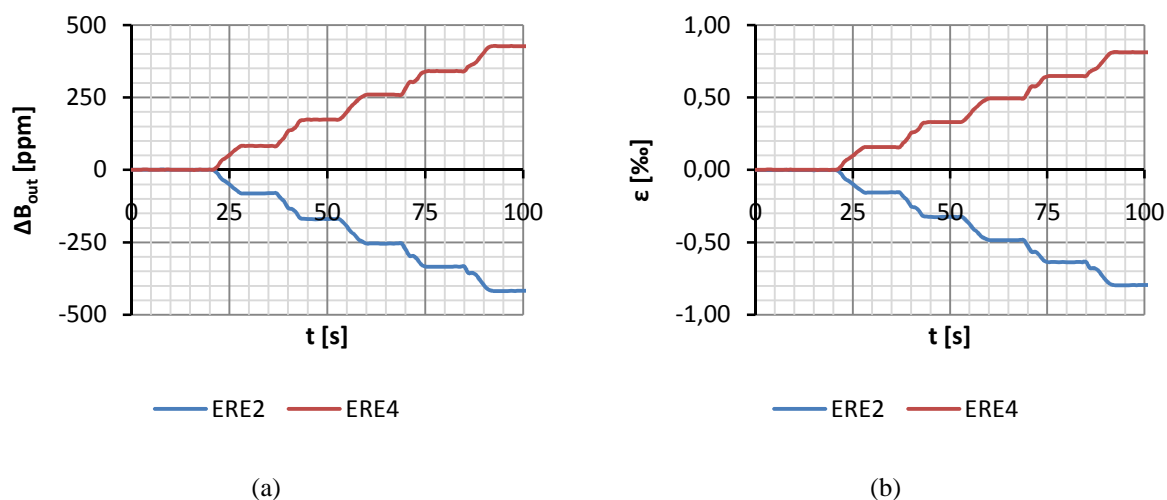


Fig. 4.34 – Medições com extensómetros: a) variação do sinal; b) conversão em extensão.

As medições realizadas com extensómetros eléctricos têm como objectivo conhecer a distribuição de extensões e comparar o valor de extensão teórico esperado com a média das leituras realizadas, ver Fig. 4.35, Fig. 4.36 e Fig. 4.37.

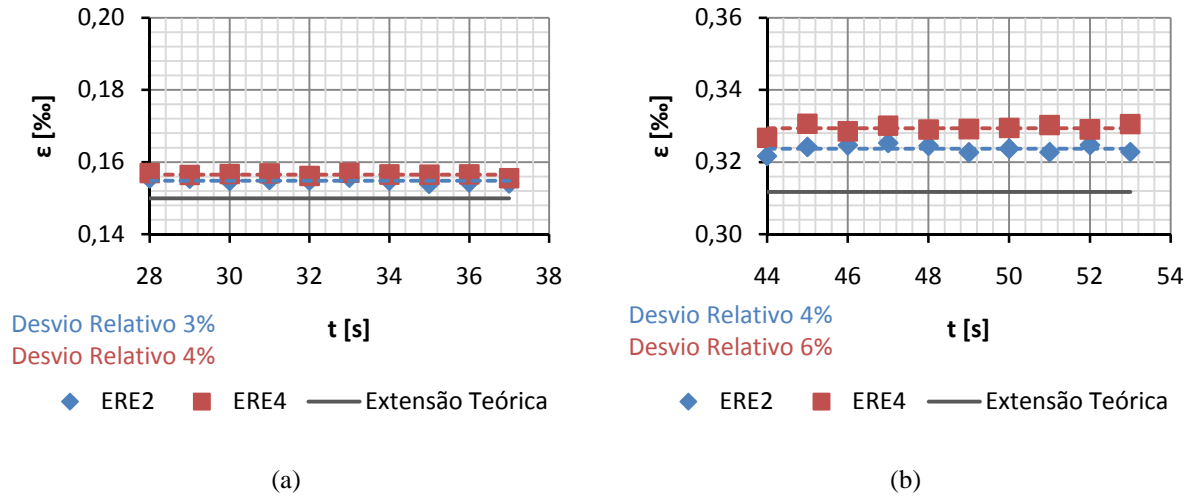


Fig. 4.35 – Estudo Secção S1: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN.

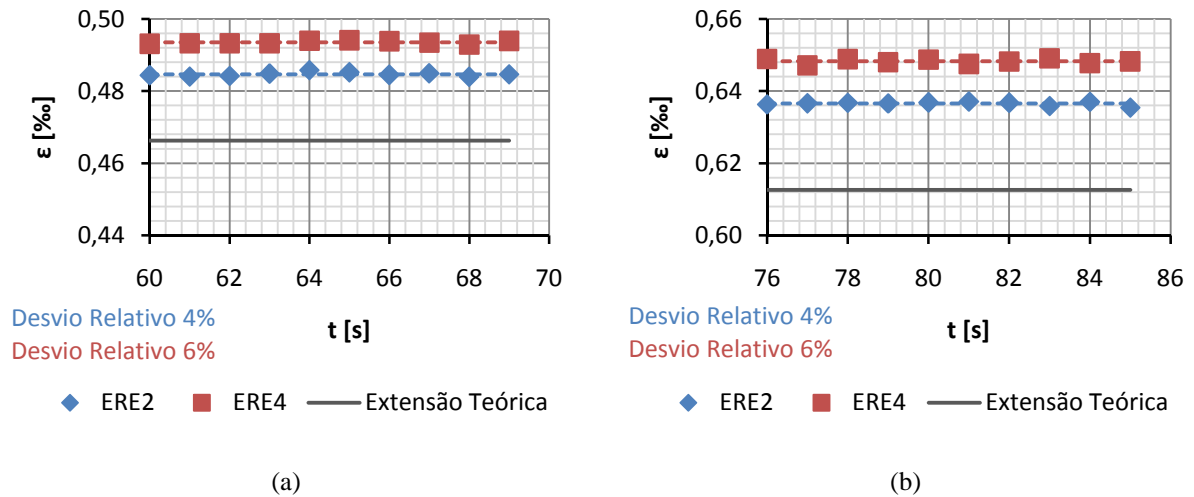


Fig. 4.36 – Estudo Secção S1: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN.

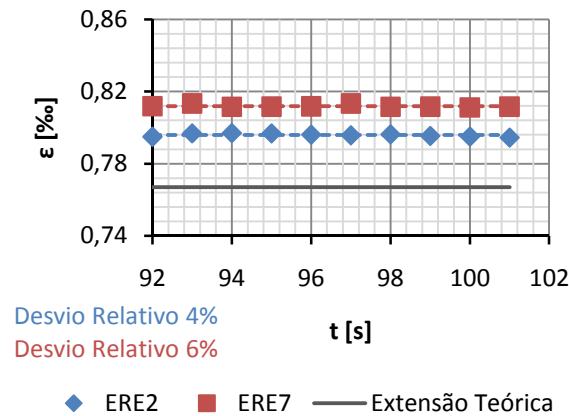


Fig. 4.37 – Estudo Secção S1, Patamar 50kN.

De acordo com a informação exposta, conclui-se que ao desvio relativo entre os valores lidos e os teóricos corresponde um intervalo de 4% a 8%.

O Quadro 4.9 resume os valores médios de extensão obtidos nos diversos patamares, bem como os extrapolados para cargas exactas de 10kN, 20kN, 30kN, 40kN e 50kN,  $\bar{\varepsilon}_x$ . Com base na informação retirada do Quadro 4.9 e do Anexo A são conhecidas as extensões ao longo do desenvolvimento longitudinal da viga, bem como na direcção perpendicular ao eixo desta.

Quadro 4.9 – Extensões médias por patamar e sensor, Secção S1.

| Patamar | F <sub>real</sub> [kN] | Sensor | $\bar{\varepsilon}$ [‰] | $\bar{\varepsilon}_x$ [‰] |
|---------|------------------------|--------|-------------------------|---------------------------|
| 10kN    | 9,78                   | ERE2   | 0,155                   | 0,158                     |
|         |                        | ERE4   | 0,157                   | 0,160                     |
| 20kN    | 20,33                  | ERE2   | 0,324                   | 0,318                     |
|         |                        | ERE4   | 0,329                   | 0,324                     |
| 30kN    | 30,41                  | ERE2   | 0,485                   | 0,478                     |
|         |                        | ERE4   | 0,493                   | 0,487                     |
| 40kN    | 39,96                  | ERE2   | 0,637                   | 0,637                     |
|         |                        | ERE4   | 0,648                   | 0,649                     |
| 50kN    | 50,03                  | ERE2   | 0,796                   | 0,795                     |
|         |                        | ERE4   | 0,812                   | 0,811                     |

Apresenta-se ainda o Quadro 4.10, na qual se estuda a linearidade dos sensores recorrendo ao desvio relativo de cada um para cada patamar de carga. De salientar que à semelhança do que foi referido para as Fig. 4.35, Fig. 4.36 e Fig. 4.37, relativas à Secção S1, os desvios que se apresentam são calculados com os valores de  $\bar{\varepsilon}$  do Quadro 4.9 e não de  $\bar{\varepsilon}_x$ . Estes últimos serão posteriormente comparados com os valores de extensão obtidos do modelo numérico gerado.

Quadro 4.10 – Resumo de desvios relativos ( $\Delta$ ) por patamar e sensor.

| Patamar | $\Delta_{ERE2}$ [%] | $\Delta_{ERE4}$ [%] | $\Delta_{ERE5}$ [%] | $\Delta_{ERE7}$ [%] | $\Delta_{ERE10}$ [%] | $\Delta_{ERE12}$ [%] | $\Delta_{ERE8}$ [%] | $\Delta_{ERE13}$ [%] |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 10kN    | 3,2                 | 4,4                 | 1,9                 | 1,5                 | 1,3                  | 3,9                  | -0,7                | -0,4                 |
| 20kN    | 3,8                 | 5,6                 | 3,0                 | 0,9                 | 1,4                  | 4,4                  | 1,5                 | 1,1                  |
| 30kN    | 3,9                 | 5,8                 | 3,0                 | 0,5                 | 1,0                  | 4,1                  | 1,9                 | 1,4                  |
| 40kN    | 3,9                 | 5,8                 | 2,9                 | 0,2                 | 1,0                  | 4,1                  | 2,0                 | 1,6                  |
| 50kN    | 3,8                 | 5,9                 | 2,8                 | 0,0                 | 1,0                  | 4,0                  | 2,0                 | 1,7                  |

Na Fig. 4.38 representa-se esquematicamente a distribuição destas extensões pelas três secções instrumentadas para o patamar de 10kN. Da análise desta constata-se que o valor médio de extensões de compressão é praticamente coincidente nas três secções. Por outro lado, verifica-se que para cada secção o valor de extensão de compressão é sensivelmente igual ao valor de extensão de tracção.

É na análise ao longo dos banzos das secções que se nota uma maior disparidade de extensões, quando na realidade estas deveriam apresentar os mesmos valores. Pese embora o valor médio por banzo seja coerente nas três secções, a dissimilitude verificada entre abas indica, à partida, que o facto de se utilizarem diferentes técnicas de colagem pode comprometer os resultados obtidos para valores baixos de carga, uma vez que a interface sensor/estrutura pode comportar-se de forma diferente em fases iniciais de carregamento. Outras explicações para esta diferença podem residir no facto do demonstrador não estar a ser solicitado de forma igual ao longo do banzo, devido à má centragem transversal da célula de carga, ou mesmo pela superfície dos banzos não ser perfeitamente plana. Do ponto de vista do autor, estas duas últimas justificações são as mais plausíveis para os dados registados, visto as abas do lado direito do perfil apresentarem valores mais elevados de extensão quando comparadas com as abas do lado esquerdo.

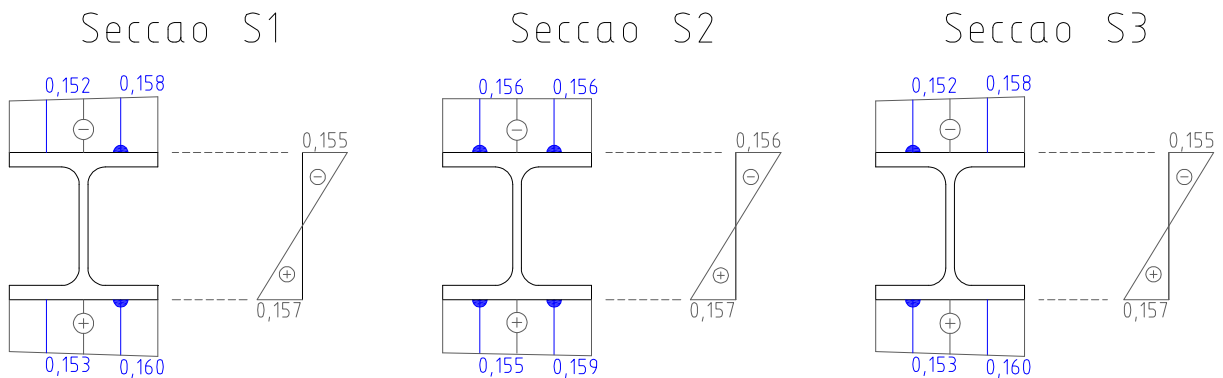


Fig. 4.38 – Diagramas de extensões finais para patamar de 10kN [%].

#### 4.7.2. MEDIÇÕES DE ROTAÇÕES COM INCLINÓMETROS

A Fig. 4.39 mostra a variação da intensidade de corrente,  $\Delta I$ , em função da força  $F$  aplicada, bem como a conversão desta variação de sinal em rotação e a sua relação com o momento flector, (4.6). Nesta, a azul representa-se a informação relativa ao inclinómetro localizado sobre o apoio esquerdo e a vermelho os dados adquiridos do inclinómetro sobre o apoio direito.

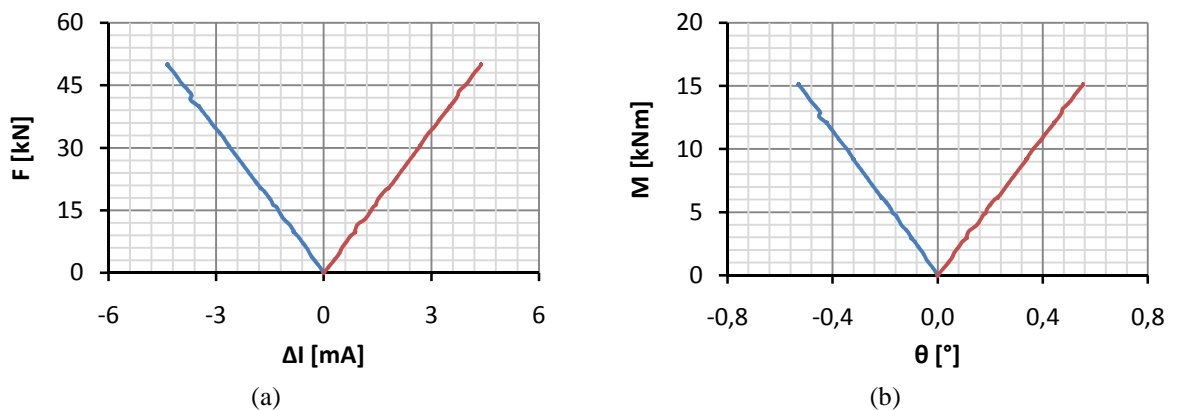


Fig. 4.39 – Medições com inclinómetros: a) variação de corrente; b) conversão em rotação.

De forma a analisar os resultados obtidos nos inclinómetros, comparar-se-ão os valores medidos nos diferentes patamares com os valores teóricos de rotações ao nível dos apoios. Da Fig. 4.40, Fig. 4.41 e Fig. 4.42, constata-se que neste ensaio estático os inclinómetros instalados no perfil HEB apresentam o mesmo comportamento do procedimento laboratorial anterior, isto é, existe uma ligeira diferença

entre as rotações nas secções dos apoios esquerdo e direito, a qual é directamente proporcional ao nível de carga aplicada à estrutura.

Por outro lado, em todos os patamares, a secção do apoio esquerdo parece rodar menos para o mesmo momento flector do que a do apoio da direita. A origem desta situação, conforme debatido no ensaio anterior, poderá estar na má centragem da viga/carga, visto apenas uma falta de simetria poder originar rotações diferentes nos inclinómetros. Por último, em todos os patamares verificou-se que o inclinómetro da esquerda apresentava um desvio relativo inferior ao inclinómetro da direita. De facto, na fase inicial o inclinómetro do apoio esquerdo tem um desvio de 0%, ascendendo aos 3% no patamar relativo aos 50kN, enquanto o inclinómetro da direita apresenta um valor de 10% para o primeiro patamar e 8% no último, Quadro 4.11.

Por último no Quadro 4.12 apresentam-se os valores de rotações teóricas para forças exactas de 10kN a 50kN, bem como os valores de rotações registados nos inclinómetros caso a força aplicada por patamar fosse rigorosamente 10kN, 20kN, 30kN, 40kN e 50kN.

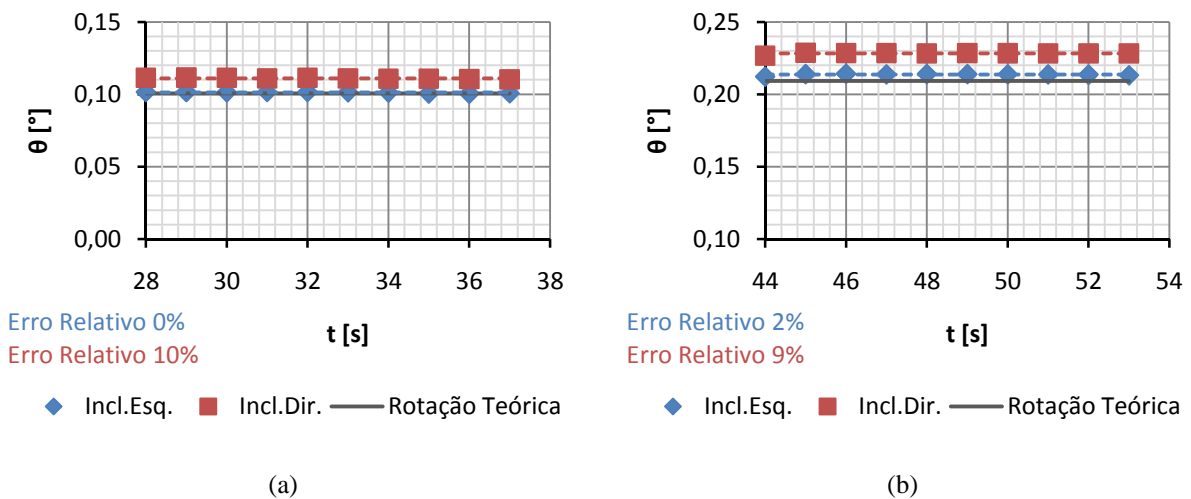


Fig. 4.40 – Estudo de rotações: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN.

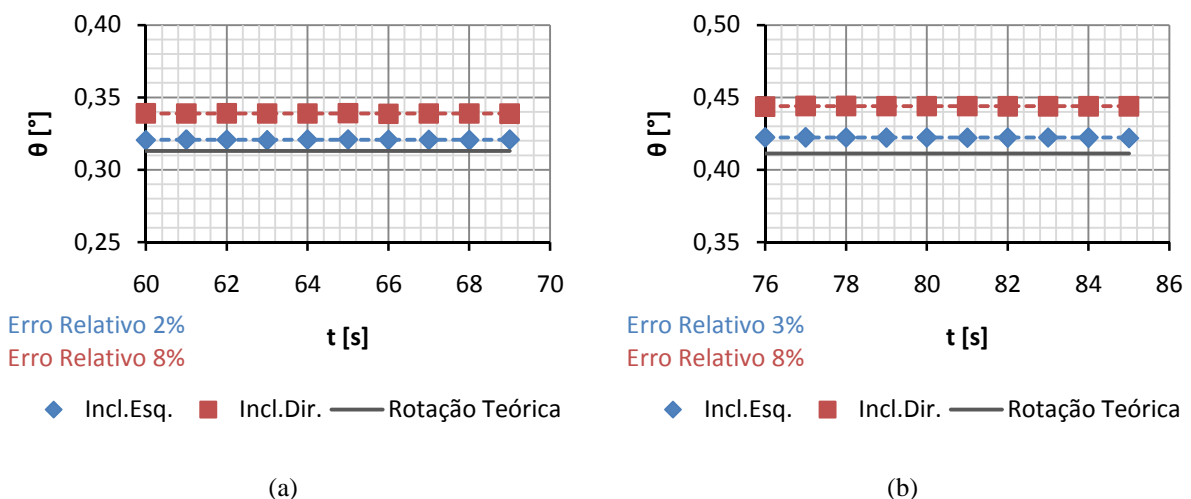


Fig. 4.41 – Estudo de rotações: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN.

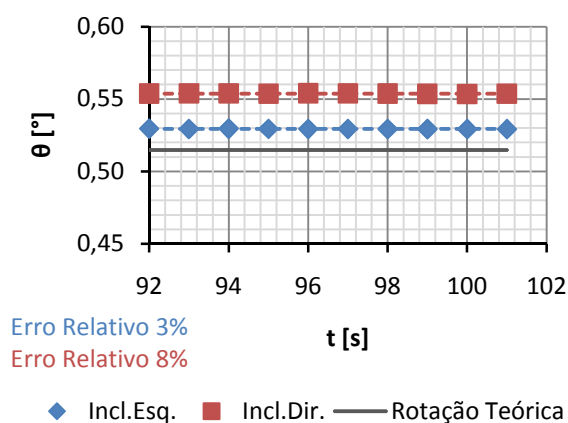


Fig. 4.42 – Estudo de rotações, Patamar 50kN.

Quadro 4.11 – Resumo de rotações e desvios associados.

| Patamar | $F_{\text{real}}$ [kN] | $\overline{\theta}_{\text{teo}}$ [°] | $\overline{\theta}_{\text{esq}}$ [°] | Desvio [%] | $\overline{\theta}_{\text{dir}}$ [°] | Desvio [%] |
|---------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|
| 10kN    | 9,78                   | 0,101                                | 0,101                                | 0,5        | 0,111                                | 10,3       |
| 20kN    | 20,33                  | 0,209                                | 0,214                                | 2,1        | 0,228                                | 9,0        |
| 30kN    | 30,41                  | 0,313                                | 0,321                                | 2,5        | 0,339                                | 8,3        |
| 40kN    | 39,96                  | 0,411                                | 0,422                                | 2,7        | 0,444                                | 8,0        |
| 50kN    | 50,03                  | 0,515                                | 0,529                                | 2,8        | 0,554                                | 7,6        |

Quadro 4.12 – Valores de rotações para valores exactos de força.

| Patamar | $\overline{\theta}_{\text{teo}}$ [°] | $\overline{\theta}_{\text{esq}}$ [°] | $\overline{\theta}_{\text{dir}}$ [°] |
|---------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 10kN    | 0,103                                | 0,104                                | 0,114                                |
| 20kN    | 0,206                                | 0,210                                | 0,224                                |
| 30kN    | 0,309                                | 0,316                                | 0,334                                |
| 40kN    | 0,412                                | 0,423                                | 0,444                                |
| 50kN    | 0,515                                | 0,529                                | 0,553                                |

### 4.7.3. MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS COM LVDT

A Fig. 4.43 exibe a variação de diferença de potencial,  $\Delta U$ , em função da força  $F$  aplicada, bem como a conversão desta variação em flecha pela equação (4.17).

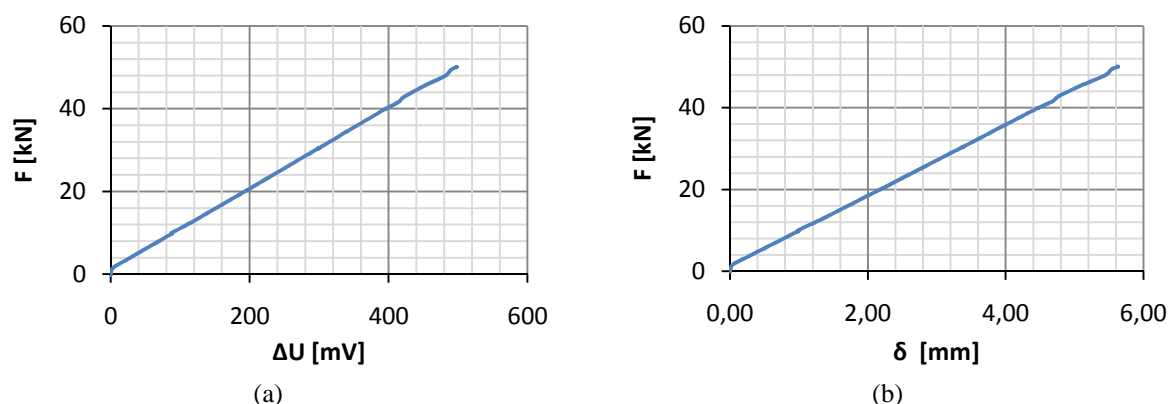


Fig. 4.43 – Medições com LVDT: a) variação de tensão; b) conversão em deslocamentos.

A avaliação do desempenho do LVDT consiste na comparação dos dados obtidos com o valor de deslocamento, dado pelo Método UFC. Este método foi já exposto pelo que se considera não ser necessário tecer qualquer consideração extra a seu respeito.

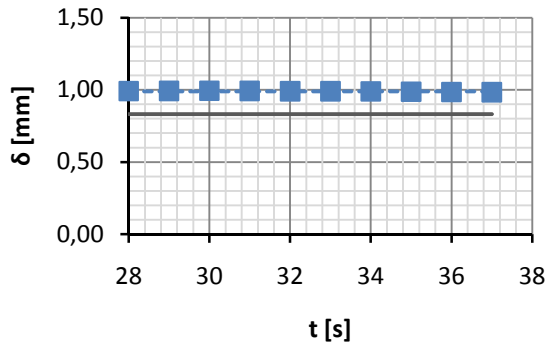
Nas Fig. 4.44, Fig. 4.45 e Fig. 4.46 apresentam-se os valores teóricos de  $\delta$ , os valores medidos, bem como o desvio relativo entre estes. O que se verifica numa primeira análise deste ensaio é que a ordem de grandeza do desvio continua bastante superior à que tinha vindo a ser determinada em todos os outros tipos de sensores. O deslocamento teórico calculado é bastante inferior ao real, o que indica claramente que a deformação por corte, desprezada na equação (4.20), tem um papel fundamental nesta viga. De facto, essa importância é estranhamente menos significativa para níveis mais baixos de carga, dado no primeiro patamar se ter determinado um desvio de 19%, enquanto a partir do patamar de 20kN estes são de aproximadamente 30%, Quadro 4.13. Contudo, no domínio da Teoria da Elasticidade a influencia do corte não deveria depender do valor da carga, uma vez que para qualquer valor de força  $M$  e  $V$  crescem proporcionalmente com esta, e  $EI$  e  $GA$  não variam, (4.23)

$$\frac{\int \frac{M\bar{M}}{EI} dz}{\int \frac{V\bar{V}}{GA} dz} = \text{Constante} \quad (4.23)$$

Conforme mencionado no ensaio anterior, a avaliação do LVDT carece da análise do modelo numérico da estrutura, o qual será apresentado no subcapítulo 4.8, Para tal incluem-se os valores  $\bar{\delta}_x$  de modo a estes serem posteriormente comparados com os valores obtidos no modelo.

Quadro 4.13 – Resumo de deslocamentos e desvios associados.

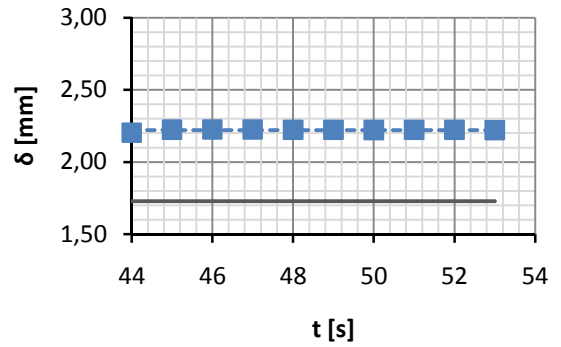
| Patamar | $F_{real}$ [kN] | $\bar{\delta}_{teo}$ [mm] | $\bar{\delta}$ [mm] | Desvio [%] | $\bar{\delta}_x$ [mm] |
|---------|-----------------|---------------------------|---------------------|------------|-----------------------|
| 10kN    | 9,78            | 0,83                      | 0,99                | 18,9       | 0,97                  |
| 20kN    | 20,33           | 1,73                      | 2,22                | 28,4       | 2,26                  |
| 30kN    | 30,41           | 2,59                      | 3,38                | 30,6       | 3,43                  |
| 40kN    | 39,96           | 3,40                      | 4,47                | 31,4       | 4,46                  |
| 50kN    | 50,03           | 4,26                      | 5,62                | 32,1       | 5,63                  |



Desvio Relativo 19%

■ LVDT — Deslocamento Teórico

(a)

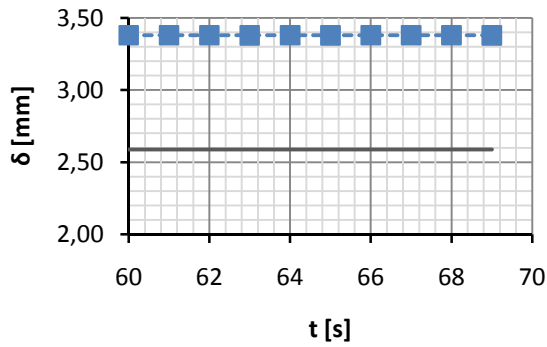


Desvio Relativo 28%

■ LVDT — Deslocamento Teórico

(b)

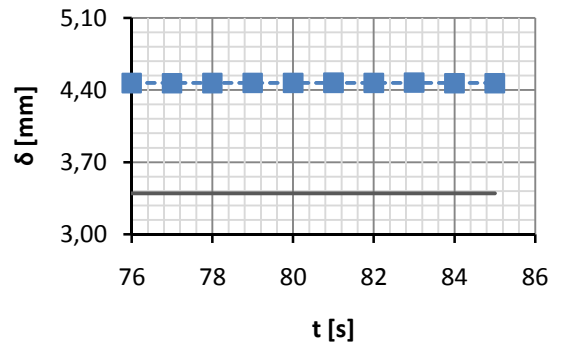
Fig. 4.44 – Estudo de deslocamentos: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN.



Desvio Relativo 31%

■ LVDT — Deslocamento Teórico

(a)

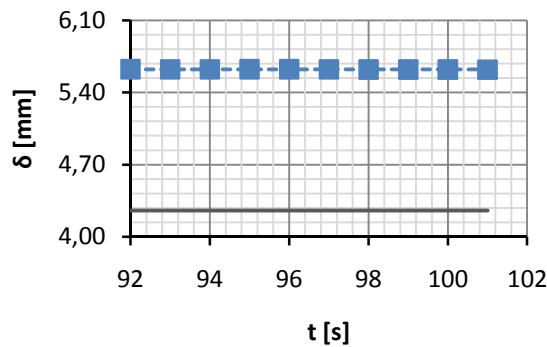


Desvio Relativo 31%

■ LVDT — Deslocamento Teórico

(b)

Fig. 4.45 – Estudo de deslocamentos: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN.



Desvio Relativo 32%

■ LVDT — Deslocamento Teórico

Fig. 4.46 – Estudo de deslocamentos, Patamar 50kN.

## 4.8. MODELAÇÃO DA VIGA COM RECURSO AO MEF

### 4.8.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A modelação em elementos finitos do demonstrador laboratorial, mais propriamente da viga, foi realizada no programa ANSYS, versão 12.0, tendo sido utilizados elementos de casca distribuídos segundo uma malha quadrada com 1cm de lado, Fig. 4.47. O elemento finito utilizado na modelação foi o *Shell63*, o qual é um elemento de casca de quatro nós, com seis graus de liberdade em cada um, três de translação e três de rotação.

A aplicação das cargas e os apoios do perfil metálico, foram considerados lineares ao longo da banzo superior e inferior, respectivamente.

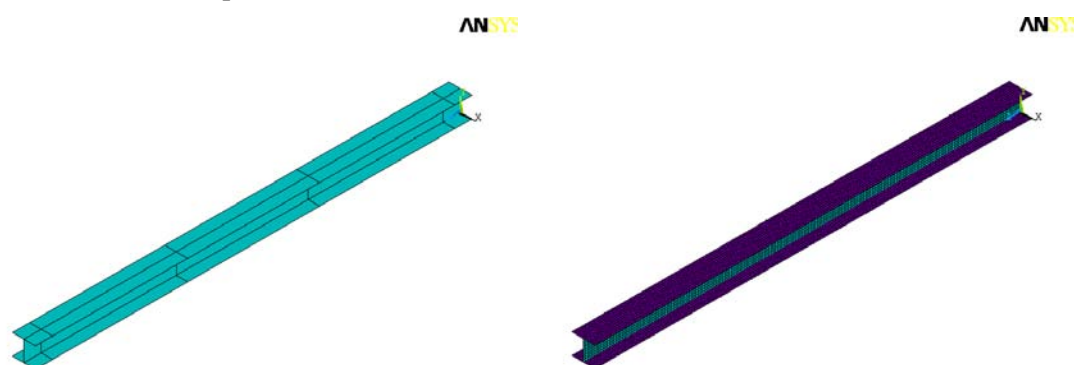


Fig. 4.47 – Modelo de perfil metálico e malha de elementos finitos.

### 4.8.2. REGISTO DE OBSERVAÇÕES

Apresenta-se no Quadro 4.14 o registo de deslocamentos e rotações obtidos no modelo de cálculo para diferentes níveis de carga aplicada, de modo a estes poderem ser comparados com os valores  $\bar{\delta}_x$ ,  $\bar{\theta}_{esq}$  e  $\bar{\theta}_{dir}$  adquiridos no sistema de monitorização.

Quadro 4.14 – Deslocamentos e rotações obtidos no ANSYS.

| F [kN] | $\bar{\delta}$ [mm] | $\theta_{apoio}$ [°] |
|--------|---------------------|----------------------|
| 10     | 1,13                | 0,108                |
| 20     | 2,26                | 0,216                |
| 30     | 3,38                | 0,324                |
| 40     | 4,51                | 0,432                |
| 50     | 5,64                | 0,540                |

O deslocamento da viga apresentado é o medido no nó central do banzo inferior da secção a meio vão. Por sua vez, a rotação que se apresenta no Quadro 4.14 é a do nó localizado no centro do banzo superior da viga, imediatamente acima de um dos apoios da estrutura, visto esta ser igual em ambos.

Inclui-se a Fig. 4.48, a qual representa a deformada do perfil metálico quando submetido a duas cargas pontuais de 25kN cada, e a correspondente distribuição de deslocamentos, sob a forma de gráfico *contour plot*.

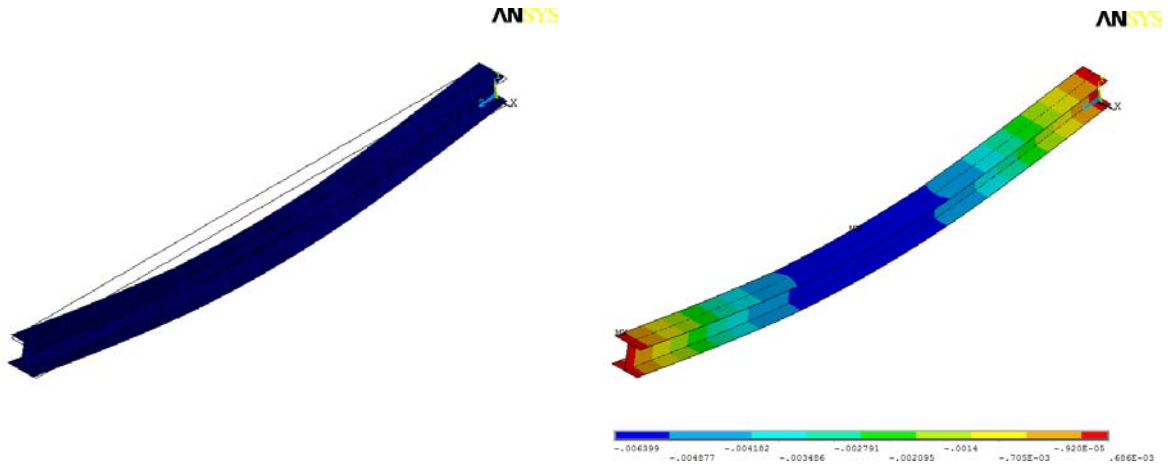


Fig. 4.48 – Deformada da viga e distribuição de deslocamentos.

Relativamente ao cálculo de extensões no modelo, estas foram avaliadas nos nós onde os extensómetros se encontram instalados, Quadro 4.15. Na Fig. 4.49 mostra-se a localização desses mesmos nós e apresenta-se a malha de elementos de casca que converge no nó em questão.

Quadro 4.15 – Extensões obtidas no ANSYS.

| F [kN] | Secção S1/S3               |                            | Secção S2                  |                            |
|--------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|        | $\epsilon_{sup} \cdot [‰]$ | $\epsilon_{inf} \cdot [‰]$ | $\epsilon_{sup} \cdot [‰]$ | $\epsilon_{inf} \cdot [‰]$ |
| 10     | 0,151                      | 0,156                      | 0,156                      | 0,156                      |
| 20     | 0,302                      | 0,312                      | 0,311                      | 0,311                      |
| 30     | 0,453                      | 0,467                      | 0,467                      | 0,467                      |
| 40     | 0,604                      | 0,623                      | 0,622                      | 0,622                      |
| 50     | 0,755                      | 0,779                      | 0,778                      | 0,778                      |

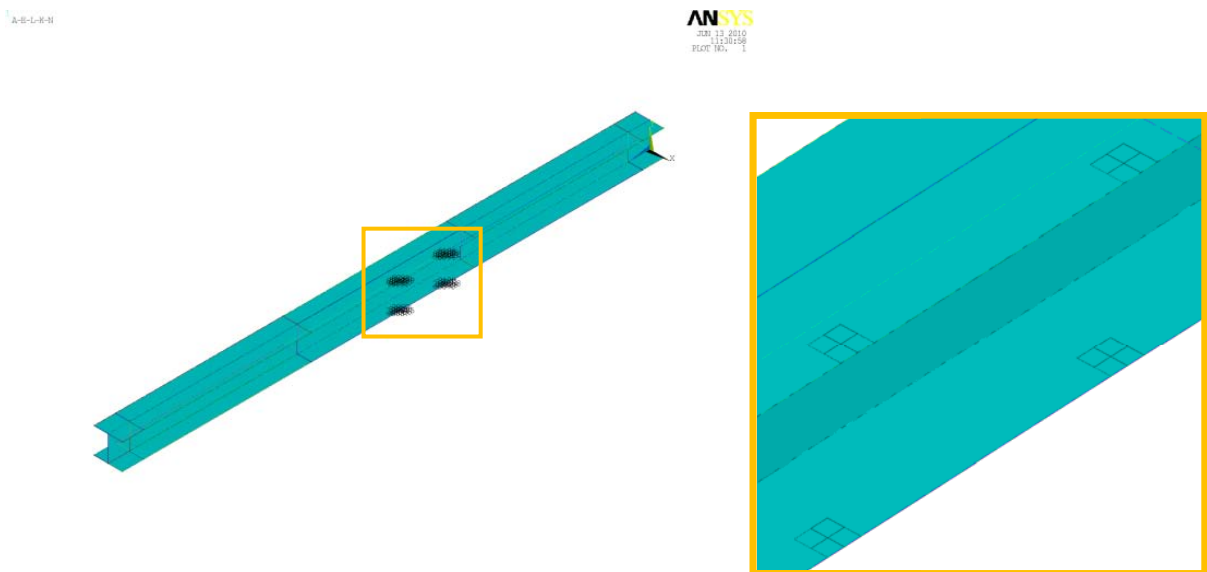


Fig. 4.49 – Localização dos elementos necessários à medição de extensões.

A Fig. 4.50 contém a representação gráfica da distribuições de extensões ao longo do modelo e nesta é possível confirmar o que havia sido referido aquando da avaliação do desempenho dos extensómetros. De facto a deformação é superior junto aos pontos de aplicação das cargas e, apenas num espaço limitado da zona a meio vão, esta é igual ao longo de toda a secção do perfil.

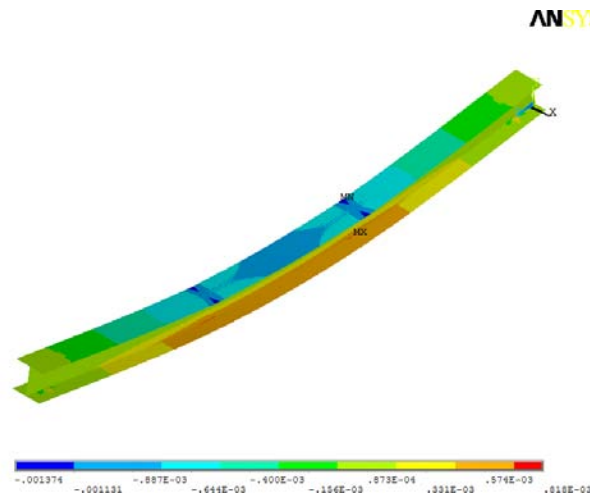


Fig. 4.50 – Distribuição de extensões na viga.

#### 4.8.3. COMPARAÇÃO DO MODELO COM O SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

##### *Ensaio Estático 4*

Dado o Ensaio 4 ser do tipo cíclico, em que se realizaram três cargas dos 0kN aos 50kN, apenas se compara com o modelo criado a média dos resultados laboratoriais para uma força de 50kN. Os valores de deslocamentos obtidos a meio vão e as rotações nos apoios esquerdo e direito do Ensaio Estático 4 podem ser consultadas no Quadro 4.16. Nesta mesma inclui-se o desvio das grandezas em questão em relação ao modelo de elementos finitos.

Quadro 4.16 – Deslocamentos e rotações adquiridos e desvios em relação ao modelo.

| F [kN] | $\delta$ [mm] | Desvio [%] | $\theta_{\text{esq}}$ [°] | Desvio [%] | $\theta_{\text{dir}}$ [°] | Desvio [%] |
|--------|---------------|------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|
| 50     | 5,50          | -2,4       | 0,530                     | -1,8       | 0,556                     | 3,1        |

A primeira e mais evidente conclusão a retirar é que a ordem de grandeza do desvio associado ao LVDT, determinado anteriormente aquando da comparação dos valores medidos por este com os previstos pelo Método da Unidade Fictícia de Carga, reduziu drasticamente de aproximadamente 30% para -2,4%. De facto, a não inclusão da parcela relativa ao deslocamento por corte neste método não foi prudente.

No que concerne às rotações ao nível dos apoios, o modelo vem comprovar as conclusões tecidas no Ensaio 4, onde se afirmou que a resposta dada pelos inclinómetros cumpriu com os objectivos, uma vez que os valores medidos se encontravam relativamente próximos dos teóricos esperados, mesmo que a centragem da carga possa ter comprometido um maior rigor nos dados adquiridos.

Com base no diagrama de extensões representado na Fig. 4.23 apresentam-se os Quadro 4.17 e Quadro 4.18, contendo a primeira as médias das extensões adquiridas no Ensaio Estático 4 para uma força de

50kN e a segunda o desvio dessas mesmas extensões em relação aos valores obtidos do modelo numérico.

Quadro 4.17 – Resultados de extensões Ensaio 4.

| F [kN] | Secção S1        |                  |                  | Secção S2        |                     |                     | Secção S3        |                     |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------|
|        | $\epsilon_2$ [‰] | $\epsilon_4$ [‰] | $\epsilon_5$ [‰] | $\epsilon_7$ [‰] | $\epsilon_{10}$ [‰] | $\epsilon_{12}$ [‰] | $\epsilon_8$ [‰] | $\epsilon_{13}$ [‰] |
| 50     | 0,799            | 0,814            | 0,788            | 0,772            | 0,775               | 0,798               | 0,800            | 0,814               |

Quadro 4.18 – Desvios relativos ( $\Delta$ ) de extensões entre Ensaio 4 e modelo.

| F [kN] | Secção S1      |                |                | Secção S2      |                   |                   | Secção S3      |                   |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|
|        | $\Delta_2$ [%] | $\Delta_4$ [%] | $\Delta_5$ [%] | $\Delta_7$ [%] | $\Delta_{10}$ [%] | $\Delta_{12}$ [%] | $\Delta_8$ [%] | $\Delta_{13}$ [%] |
| 50     | 5,8            | 4,5            | 1,4            | -0,8           | -0,3              | 2,7               | 6,0            | 4,5               |

Da análise do Quadro 4.18 verifica-se que os extensómetros localizados na Secção S2 são aqueles que apresentam menor erro, à semelhança do que havia sido concluído no subcapítulo 4.6. Por outro lado, os extensómetros da Secção S1 e S3 parecem exibir respostas semelhantes visto os desvios em relação ao modelo serem aproximadamente os mesmos entre os sensores ERE2 e ERE8, e ERE4 e ERE13. Uma vez mais, comparando os valores aqui apresentados para as secções S1 e S3 com os obtidos no Ensaio Estático 4 parece haver concordância entre ambos.

### Ensaio Estático 5

Face aos resultados apresentados no Quadro 4.14 é possível avaliar a semelhança entre deslocamentos medidos com o LVDT e aqueles obtidos no modelo de elementos finitos. Esta comparação é especialmente importante na medida que no Ensaio 5, a análise de resultados do sensor não foi de todo conclusiva.

No que concerne à avaliação dos inclinómetros eléctricos foi demonstrado que as rotações medidas por estes se aproximavam dos valores previstos na teoria. Pese embora a má centragem da carga ter resultado em rotações de apoio diferentes, o que para um caso de solicitação simétrica não é verdade, pretende-se comparar estes valores com os indicados pelo modelo numérico, de forma a perceber se estes últimos são balizados pela resposta dos inclinómetros.

Quadro 4.19 – Resultados de deslocamentos e rotações Ensaio 5.

| F [kN] | $\delta$ [mm] | $\theta_{\text{esq}}$ [°] | $\theta_{\text{dir}}$ [°] |
|--------|---------------|---------------------------|---------------------------|
| 10     | 0,97          | 0,103                     | 0,114                     |
| 20     | 2,26          | 0,210                     | 0,224                     |
| 30     | 3,43          | 0,316                     | 0,334                     |
| 40     | 4,46          | 0,423                     | 0,444                     |
| 50     | 5,63          | 0,529                     | 0,553                     |

No Quadro 4.19 apresentam-se os resultados de deslocamentos e rotações do Ensaio Estático 5, os quais comparados com os dados do Quadro 4.14 resultam nas Fig. 4.51 e Fig. 4.52.

Na primeira destas verifica-se que no patamar de 10kN o desvio entre o LVDT e o modelo numérico é de aproximadamente 15%, o qual se considera ser um valor significativo. Este poderá dever-se ao facto de para fases iniciais do carregamento o perfil metálico, e demais constituintes do demonstrador laboratorial, apresentarem pequenos ajustes ao nível dos pontos de aplicação de carga e dos apoios, os quais fazem diminuir a flecha realmente medida pelo sensor. Nos restantes patamares o desvio oscila entre 1 e 0%, o que indica que o LVDT utilizado se encontra bem calibrado.

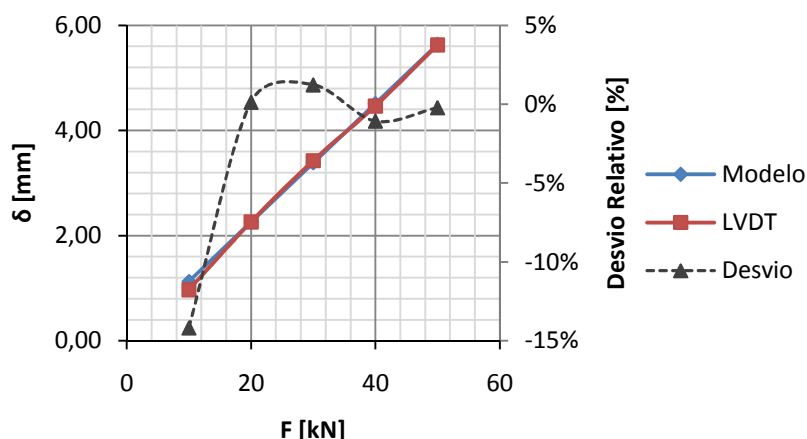


Fig. 4.51 – Comparação de deslocamentos entre LVDT e modelo numérico.

Seguidamente efectua-se o estudo comparativo das rotações nos apoios da viga. Na Fig. 4.52 verifica-se que os valores dos inclinómetros esquerdo e direito balizam a resposta prevista no modelo, dado o desvio relativo destes ser negativo e positivo, respectivamente. Conclui-se também que os valores do inclinómetro esquerdo estão mais próximos dos obtidos no ANSYS, o que vem confirmar o que havia sido referido anteriormente neste trabalho.

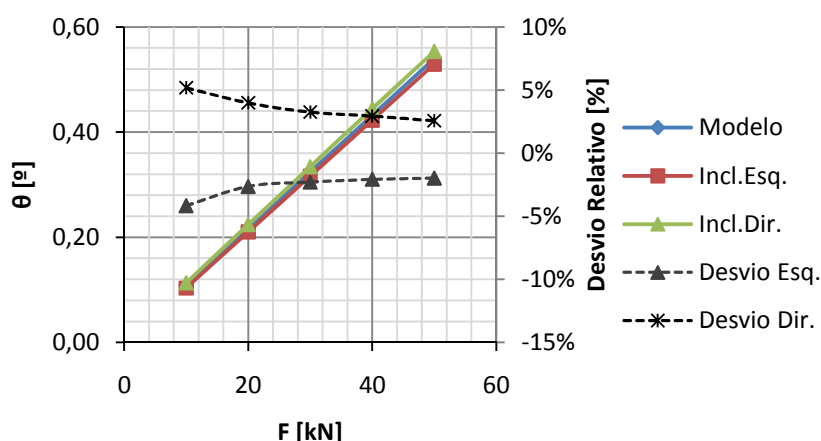


Fig. 4.52 – Comparação de rotações entre inclinómetros e modelo numérico.

Com base no desempenho evidenciado tanto pelo LVDT como pelos inclinómetros, conclui-se que estes sensores são soluções eficazes em sistemas de monitorização para medição de deslocamentos verticais em estruturas, ou mesmo de deslocamentos horizontais devido a abertura de juntas, e rotações.

O Quadro 4.20 resume as extensões obtidas na rede de extensómetros eléctricos para diferentes valores de força, enquanto o Quadro 4.21 contém os desvios destes em relação aos valores inicialmente avançados no Quadro 4.15. Da análise do Quadro 4.21 conclui-se que os sensores localizados na Secção S2 e S3 são os que menor desvio relativo apresentam, sendo o extensómetro ERE2 o que parece estar mais afastado do modelo numérico com valores que ascendem aos 5,5%.

A título exemplificativo apresenta-se a Fig. 4.53, na qual se analisa o desvio relativo entre os sensores ERE8 e ERE13 e o modelo numérico desenvolvido. O motivo por se ter elegido os sensores instalados na Secção S3 deve-se ao facto do sensor ERE13 ser aquele que apresenta o menor desvio de toda a rede e o sensor ERE8 apresentar valores intermédios da ordem dos 3%.

Quadro 4.20 – Resultados de extensões Ensaio 5.

| F [kN] | Secção S1        |                  |                  | Secção S2        |                     |                     | Secção S3        |                     |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------|
|        | $\epsilon_2$ [‰] | $\epsilon_4$ [‰] | $\epsilon_5$ [‰] | $\epsilon_7$ [‰] | $\epsilon_{10}$ [‰] | $\epsilon_{12}$ [‰] | $\epsilon_8$ [‰] | $\epsilon_{13}$ [‰] |
| 10     | 0,158            | 0,160            | 0,156            | 0,156            | 0,155               | 0,159               | 0,152            | 0,153               |
| 20     | 0,318            | 0,324            | 0,316            | 0,309            | 0,311               | 0,320               | 0,311            | 0,310               |
| 30     | 0,478            | 0,487            | 0,474            | 0,462            | 0,465               | 0,479               | 0,469            | 0,466               |
| 40     | 0,637            | 0,649            | 0,631            | 0,615            | 0,620               | 0,638               | 0,625            | 0,623               |
| 50     | 0,795            | 0,811            | 0,788            | 0,767            | 0,774               | 0,798               | 0,782            | 0,780               |

Quadro 4.21 – Desvios relativos ( $\Delta$ ) de extensões entre Ensaio 5 e modelo.

| F [kN] | Secção S1      |                |                | Secção S2      |                   |                   | Secção S3      |                   |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|
|        | $\Delta_2$ [%] | $\Delta_4$ [%] | $\Delta_5$ [%] | $\Delta_7$ [%] | $\Delta_{10}$ [%] | $\Delta_{12}$ [%] | $\Delta_8$ [%] | $\Delta_{13}$ [%] |
| 10     | 4,79           | 2,72           | 0,50           | 0,04           | -0,12             | 2,45              | 0,85           | -2,01             |
| 20     | 5,42           | 3,98           | 1,56           | -0,54          | 0,01              | 2,90              | 3,08           | -0,45             |
| 30     | 5,52           | 4,16           | 1,51           | -0,95          | -0,41             | 2,63              | 3,49           | -0,24             |
| 40     | 5,49           | 4,15           | 1,44           | -1,19          | -0,41             | 2,62              | 3,52           | -0,01             |
| 50     | 5,34           | 4,18           | 1,32           | -1,38          | -0,45             | 2,57              | 3,57           | 0,09              |

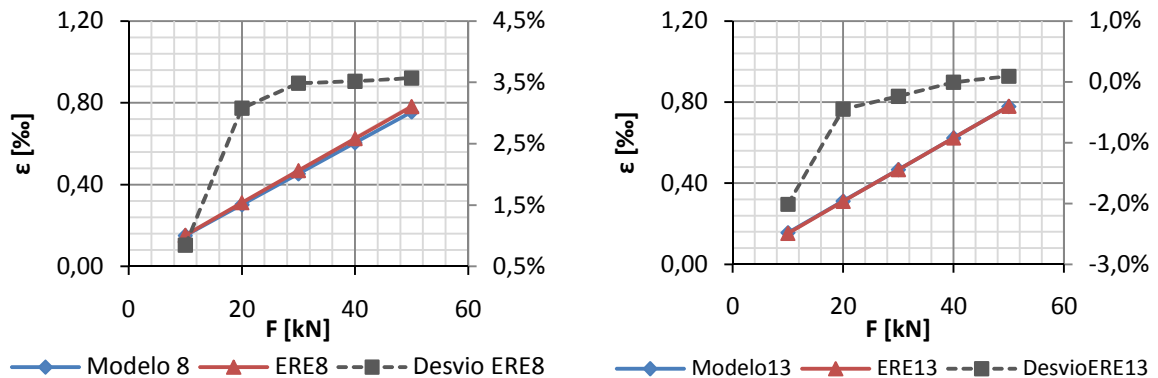


Fig. 4.53 – Análise do desvio relativo entre ERE8 e ERE13 e modelo numérico.

#### 4.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A relevância da rede de sensores como parte constituinte de um sistema de monitorização fez com que no decorrer deste capítulo se abordassem diferentes tipos de sensores, com vista a alargar o conhecimento do respectivo funcionamento e avaliar o correspondente desempenho. De modo a cumprir este objectivo, estudaram-se soluções de equipamentos cuja experiência adquirida ao longo do tempo permitia afirmar que se tratavam de sensores com elevada repetibilidade, boa estabilidade, grande sensibilidade e boa resposta a leituras estáticas.

O modelo utilizado em laboratório para avaliação do desempenho do sistema de monitorização foi constituído por uma viga metálica HEB100, simplesmente apoiada e carregada nos terços do vão. Para tal utilizou-se um actuador hidráulico manual ligado a uma célula de carga previamente calibrada.

No primeiro ensaio desenvolvido neste capítulo procurou-se avaliar o desempenho de onze extensómetros de resistência eléctrica, com vista à definição de uma rede de sensores de deformação equilibrada e uniformemente distribuída ao longo de três secções instrumentadas. Após a sua definição estudou-se a rigidez à flexão do perfil metálico, uma vez que esta influenciaria fortemente os valores teóricos com os quais se pretendiam comparar as grandezas medidas na rede de sensores. Assim, nos Ensaio Estáticos 2 e 3 submeteu-se a viga a diferentes carregamentos e concluiu-se que o valor de Módulo de *Young* desta era de 208,17GPa.

Reunidas as condições para a avaliação do desempenho da rede de sensores eléctricos realizaram-se os Ensaio 4 e 5, com esquemas de carregamento em tudo semelhantes aos dos Ensaio 2 e 3. Nestes estudou-se o comportamento dos oito extensómetros, dois inclinómetros e um LVDT.

No que concerne ao estudo da deformação do perfil no Ensaio Estático 4, os extensómetros das secções S1 e S3 apresentaram leituras praticamente coincidentes, com desvios em relação aos valores retirados da equação constitutiva de *Hooke* de 4% e 6%. Na secção S2 o desvio relativo situou-se no intervalo de 1% a 4%. De salientar que as extensões nas secções S1 e S3 foram superiores às da secção S2, conforme previsto pelo Princípio de *Saint-Venant*, dada a sua maior proximidade em relação aos pontos de aplicação da força. Por outro lado, segundo *Navier-Bernoulli*, a deformação das fibras superiores do perfil HEB seria a mesma das fibras comprimidas o que não se verifica na prática. Tal poderá ter-se devido a imperfeições e irregularidades do próprio perfil metálico ou mesmo a eventuais atritos entre os pontos de aplicação de carga e a viga, e entre esta e os pontos de apoio. As extensões de tracção na estrutura superaram as de compressão também no Ensaio Estático 5, no qual se avaliou a linearidade dos sensores, isto é, se o desvio dos mesmos variava com a carga aplicada. Concluiu-se que dos 20kN aos 50kN de força a resposta destes é linear. No subcapítulo 4.8, Modelação da , para uma força de 50kN obtiveram-se valores de desvios semelhantes aos supracitados nas secções S1 e S3. Já na Secção S2 o desvio determinado foi menor, i.e., dos 0% aos 3%. No mesmo ponto, as extensões para forças de 10kN, 20kN, 30kN e 40kN não revelaram qualquer discrepância em relação ao que havia sido previsto anteriormente.

Relativamente à medição de rotações de apoio, verificou-se que entre os valores retirados dos sensores eléctricos e os previstos pelo Método da Integração da Elástica a semelhança era praticamente garantida para o inclinómetro instalado sobre o apoio esquerdo, o qual apresentou um desvio relativo de aproximadamente 2%. A má centragem da carga em ambos os ensaios fez com que se obtivessem desvios da ordem dos 8% no inclinómetro da direita. Aquando da comparação da resposta dos inclinómetros com o modelo numérico para um valor de força de 50kN, concluiu-se que os valores retirados em laboratório com o inclinómetro esquerdo e direito balizavam o previsto pelo programa, com desvios de -2% e 3%, respectivamente. Já no ensaio por patamares os desvios entre estes

variaram de -2% a -4% no inclinómetro da esquerda e de 3% a 5% no da direita, estando o primeiro valor associado ao patamar de 10kN e o segundo ao patamar de 50kN.

O último sensor estudado foi o LVDT. Com o objectivo de avaliar o valor de deslocamento a meio vão da estrutura concluiu-se que, ao desprezar a deformação por corte, os valores previstos pelo Método da Unidade Fictícia de Carga se afastavam consideravelmente das flechas medidas. Da média dos valores medidos no Ensaio Estático 4 determinou-se um deslocamento a meio vão de 5,50mm, o qual se desviava em 29% dos 4,25mm esperados. Por sua vez, no Ensaio Estático 5 percebeu-se que o esforço transversal é importante na deformação do perfil na fase de carregamento dos 0kN aos 20kN, uma vez que a partir deste valor o desvio relativo entre valores de flechas permaneceu constante e aproximadamente igual a 30%. Assim, a simulação numérica conduzida ditou as conclusões retiradas sobre o funcionamento do LVDT. Nesta, para um valor de força de 50kN o deslocamento obtido foi 2,4% menor do que o medido em laboratório no Ensaio 4. Quando comparado com o procedimento por patamares o desvio obtido foi de -14% para 10kN e dos 20kN aos 50kN variou entre -1% e 1%, sendo mesmo igual a 0% para o último patamar.

A avaliação do desempenho de sensores eléctricos foi conduzida através da realização de diferentes ensaios, onde se compararam valores medidos em laboratório com os defendidos pela teoria e pela modulação numérica. Estes foram debatidos ao longo deste capítulo e sumariamente descritos neste subcapítulo. Contudo, para além de valores de desvios associados aos diferentes sensores, os trabalhos desenvolvidos no âmbito desta dissertação importam sobretudo pelo conhecimento obtido num primeiro contacto com a monitorização de estruturas. A instalação dos sensores no demonstrador laboratorial, o modo de funcionamento daqueles, a escolha do sistema de aquisição, a ligação entre a rede de sensores e este, bem como a recolha e tratamento da informação interrogada, são aspectos fulcrais e determinantes num processo de aprendizagem de uma área emergente como a Civiónica.



# 5

## AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO DESEMPENHO DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

### 5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na monitorização de estruturas de engenharia civil diferentes tipos de informações relacionadas com o comportamento da obra são avaliadas. A esta diversidade associa-se a possibilidade de utilização de variados tipos de sistemas de monitorização, estando a complexidade destes dependente do grau de exigência do projecto de monitorização a desenvolver. É assim previsível que as redes de sensores possam também assumir soluções diferentes consoante a aplicação a que se destinam.

Actualmente os sensores de deformação mais utilizados são os extensómetros de resistência eléctrica e os extensómetros em fibra óptica. No Capítulo 4 apresentaram-se diferentes ensaios, conduzidos na FEUP, em que se estudaram redes de sensores eléctricos que incluíam extensómetros desse tipo. Assim, na sequência do que foi referido, importa também estudar redes de extensómetros de fibra óptica.

As redes ópticas são particularmente vantajosas em sistemas de monitorização de maior escala, onde as distâncias entre os sensores e os sistemas de aquisição são mais elevadas. Isto porque em redes eléctricas os extensómetros possuem um baixo nível de tensão eléctrica, o que os torna susceptíveis à captação de ruído nos sinais medidos. Deste modo, os extensómetros de fibra óptica assumem-se como uma solução eficaz, uma vez que utilizam sinais em forma de luz totalmente imunes a interferências electrostáticas e electromagnéticas. São, no entanto, menos económicos.

Neste capítulo procura-se avaliar a consistência de resultados de diferentes tipos de extensómetros de fibra óptica, comparando estes entre si e também com valores obtidos de sensores convencionais de resistência eléctrica. De referir que os sensores ópticos utilizados ao longo deste capítulo são baseados em redes de *Bragg*, e são vulgarmente designados como *FBG sensors*, do inglês *Fiber Bragg Grating sensors*.

A secção instrumentada neste ensaio é unicamente a Secção S1, Fig. 5.1. Nesta estão localizados o extensómetro eléctrico ERE2 e três extensómetros de fibra óptica, EFO1, EFO2 e EFO3. Os extensómetros, EFO2 e EFO3 são da marca *FiberSensing*, enquanto o sensor EFO1 provém da empresa *WellTech*. Este apresenta-se como uma nova solução de extensómetros em fibra óptica, cuja principal vantagem é o preço consideravelmente mais baixo, quando comparado com outros extensómetros ópticos convencionais existentes no mercado.

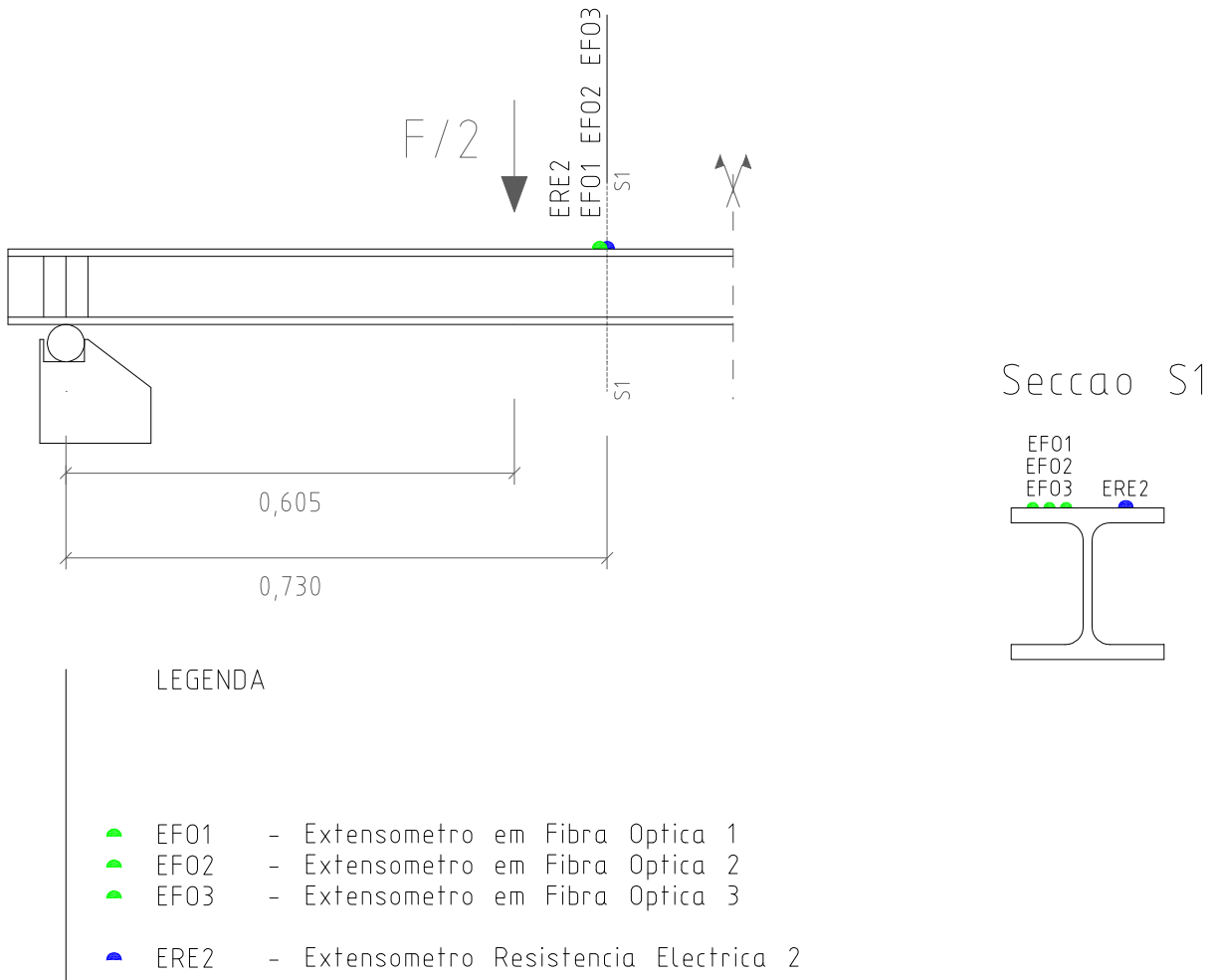


Fig. 5.1 – Instrumentação do demonstrador laboratorial.

Os sensores de fibra óptica aqui utilizados são também distintos relativamente ao modo como são fabricados. O sensor EFO1 é normalmente designado como *bare strain sensor*, enquanto o sensor EFO2 e EFO3 são classificados como *standard polyimide strain sensor* e *miniature strain sensor*, respectivamente, Fig. 5.2. Dado o âmbito em que foi desenvolvida a presente dissertação, importa averiguar sobre o desempenho destes sensores de modo a perceber se estes poderão ser considerados uma solução para futuros trabalhos desenvolvidos no seio do LABEST.

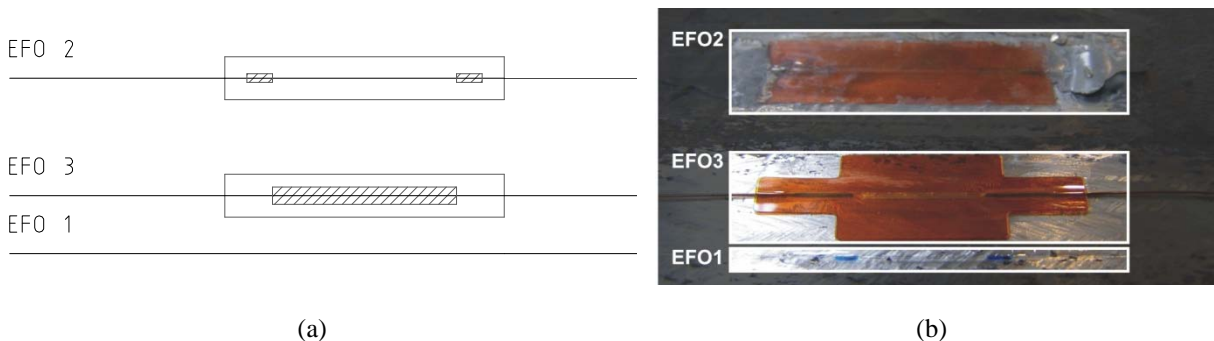


Fig. 5.2 – Sensores ópticos: a) esquema de colagem; b) aplicação em laboratório.

### 5.1.1. INSTALAÇÃO DOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Pela importância que a instalação deste tipo de sensores assume no desenvolvimento deste capítulo, apresenta-se de seguida a técnica de colagem dos extensómetros ópticos ao perfil metálico, a qual foi realizada com base nas recomendações da empresa *FiberSensing*, Fig. 5.3.

A instalação deste tipo de extensómetros inicia-se com uma correcta preparação da superfície através de trabalhos de polimento com recurso a rebarbadora eléctrica e lixa de papel, de modo a assegurar que a camada de ferrugem existente no perfil metálico seja completamente removida. Estes trabalhos devem ser realizados cuidadosamente de modo a não criar irregularidades no banzo superior da viga, procurando assim que a superfície deste continue plana.

Seguidamente é necessário limpar a superfície. Para tal é aconselhável o uso de gaze embebida inicialmente numa solução ácida, o condicionador, e posteriormente numa solução de limpeza alcalina, o neutralizador. Segundo a empresa fabricante destes sensores aconselha-se a limpar a superfície sempre segundo a mesma direcção de modo a evitar a presença de impurezas na zona de instalação do sensor.

Após a superfície de colagem estar preparada é necessário alinhar convenientemente o sensor na posição pretendida. Para tal é usual fixar este à estrutura com fita-cola de modo a poder virar-se o extensómetro e remover a respectiva capa de protecção, sem que o sensor saia da posição inicialmente marcada.

A última fase do processo diz respeito à colagem propriamente dita do sensor à estrutura. Para tal a *FiberSensing* aconselha o uso de cianoacrilato ou cola epóxida, sendo que a primeira é especialmente indicada para aplicações de curto prazo, uma vez que o tempo de cura desta cola é de apenas cinco minutos, enquanto a segunda é recomendada para campanhas de monitorização mais longas. Contudo, do ponto de vista da durabilidade e estabilidade, a cola epóxida supera o cianoacrilato.

Após a aplicação de uma camada fina e uniforme de cianoacrilato em toda a superfície do sensor é necessário fixar este na estrutura metálica, e a melhor forma de o fazer é pressionando o centro do mesmo em direcção à periferia, de modo a evitar a existência de bolhas de ar entre a estrutura e o sensor.

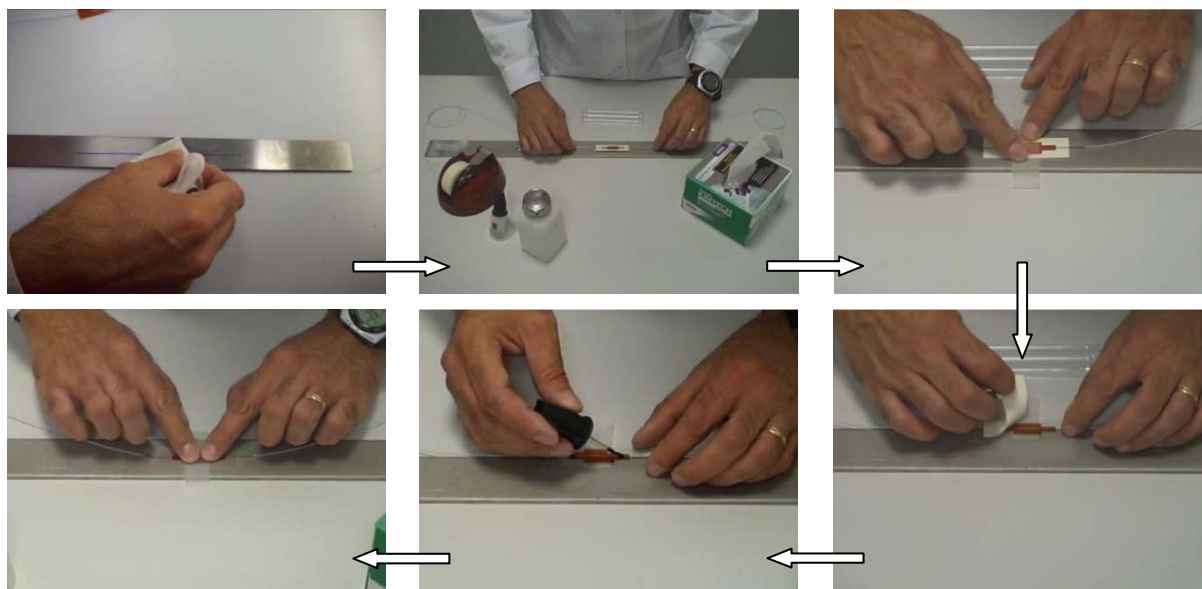


Fig. 5.3 – Instalação de extensómetro de fibra óptica.

## 5.2. ENSAIO ESTÁTICO 6

O Ensaio Estático 6 que aqui se apresenta é o primeiro dos ensaios laboratoriais em que a rede de sensores é essencialmente constituída por sensores em fibra óptica, mais concretamente sensores de Bragg. É assim objectivo principal deste ensaio introduzir estes sensores de um ponto de vista mais prático, uma vez que estes foram já abordados teoricamente no Capítulo 2.

Relativamente ao procedimento laboratorial realizado este consiste num conjunto de três ciclos de carga dos 0kN aos 50kN, tal como a Fig. 5.4 ilustra. De salientar que neste ensaio os extensómetros, tanto eléctrico como de fibra óptica, se situam no banzo superior do perfil metálico, uma vez que se pretende estudar o comportamento dos sensores ópticos quando submetidos à compressão e a eventualidade das fibras destes serem sujeitas a fenómenos de encurvadura.

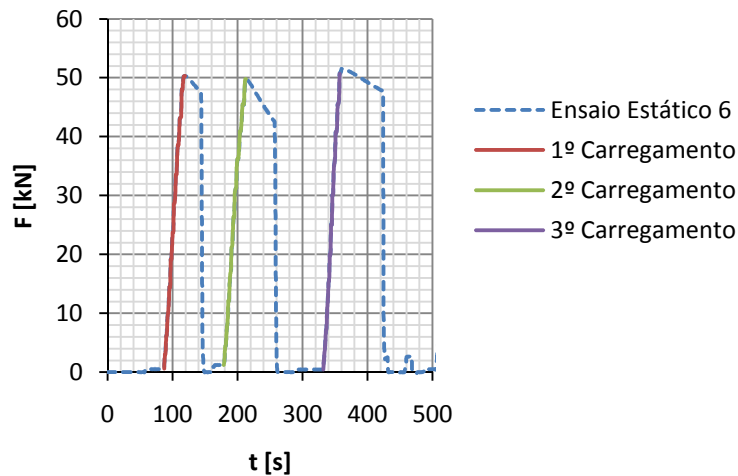


Fig. 5.4 – Ensaio Estático 6.

### 5.2.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS

A medição do sinal fornecido pelo extensómetro eléctrico ERE2 não carece de qualquer explicação adicional, uma vez que esta questão foi debatida no capítulo anterior. Assim, apresentam-se as Fig. 5.5 e Fig. 5.6 as quais ilustram o sinal de saída  $\Delta B_{out}$  ao longo do tempo e em relação à força aplicada. Nestas mesmas figuras inclui-se a conversões do sinal de saída em extensão.

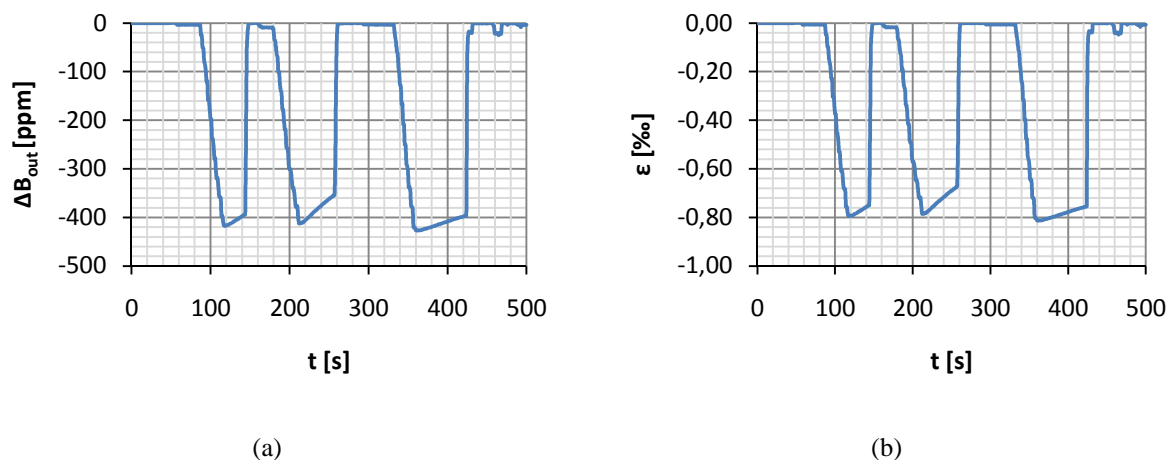


Fig. 5.5 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão.

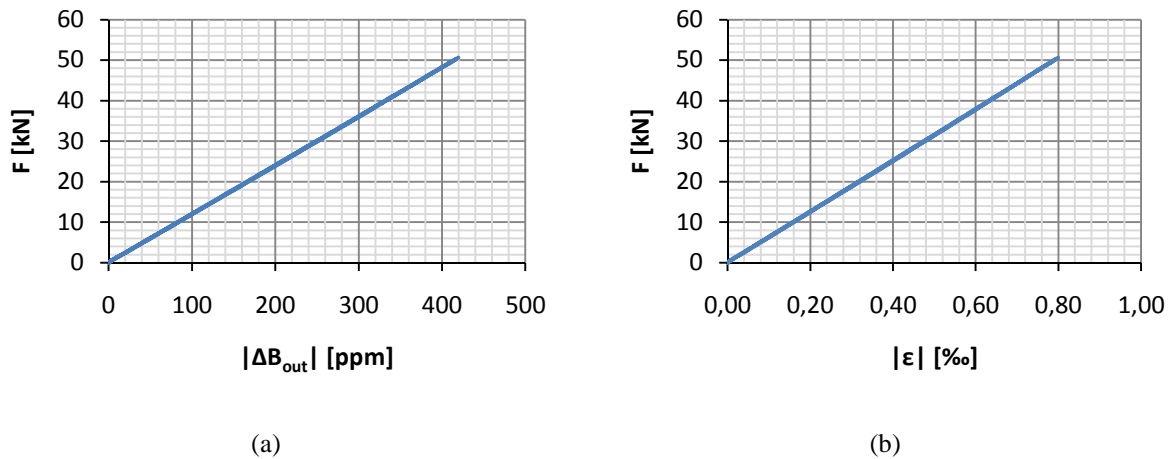


Fig. 5.6 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão.

### 5.2.2. MEDIÇÕES COM EXTENSÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA

Relativamente aos sensores de fibra óptica foi referido no Capítulo 2 que estes podem ser classificados consoante o seu princípio de funcionamento. De facto, as alterações físicas provocam em geral variações na fase, na intensidade, no comprimento de onda ou na polarização da luz propagada através de uma fibra óptica, e a partir dessas alterações é possível extrair informação acerca das grandezas a medir. Baseados na modulação do comprimento de onda, as redes de *Bragg* são actualmente uma solução fiável na concepção de sensores de deformação cujos custos podem ser considerados razoáveis. No Capítulo 2 referiu-se também a vantagem de possibilitarem a utilização de técnicas de multiplexagem, nomeadamente a multiplexagem espacial. De referir que neste ensaio recorreu-se à referida técnica optando por uma configuração em série dos diferentes extensómetros.

A expressão a utilizar para converter a variação de comprimento de onda em extensão consiste numa simplificação da equação (2.8). Nesta considerava-se a contribuição da variação da temperatura através do factor de ganho, mas dado o ensaio estático ter sido realizado num curto espaço de tempo e em ambiente laboratorial a referida variação devida à temperatura pode ser considerada nula. Apresenta-se assim a expressão (5.1) e no Quadro 5.1 resumem-se os valores de  $\lambda_0$  e  $S_\epsilon$ , indicados pelos fabricantes nas especificações técnicas de cada sensor. Deste modo foi possível representar as medições com a rede de sensores de *Bragg* em relação ao tempo, e conseqüente conversão em extensão, conforme a Fig. 5.7 apresenta.

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\lambda}{S_\epsilon} \tag{5.1}$$

Quadro 5.1 – Valores  $\lambda_0$  e  $S_\epsilon$ .

| Sensor | $\lambda_0$ [nm] | $S_\epsilon$ [pm/ $\mu\epsilon$ ] |
|--------|------------------|-----------------------------------|
| EFO1   | 1539,74          | 1,00                              |
| EFO2   | 1548,95          | 1,20                              |
| EFO3   | 1559,79          | 1,20                              |

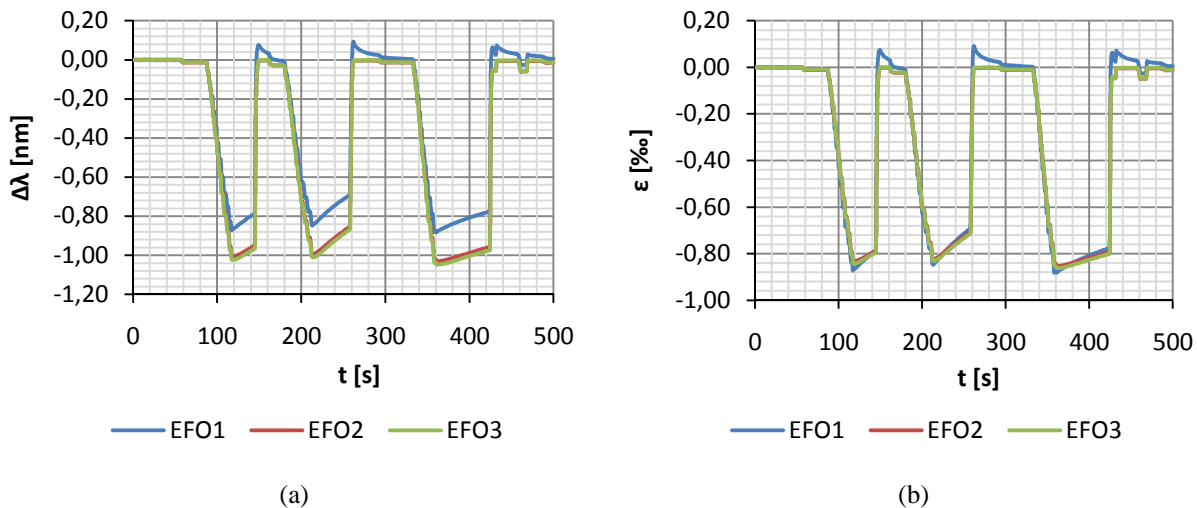


Fig. 5.7 – Medições com EFO: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão.

### 5.2.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS EXTENSÓMETROS EM FIBRA ÓPTICA

Numa primeira fase da análise dos resultados do Ensaio Estático 6 comparam-se as medições dos sensores em fibra óptica entre si. Nesta primeira análise da Fig. 5.7 todos os sensores responderam à solicitação conforme se esperava, uma vez que estão perfeitamente bem definidos os três ciclos de carga, e os valores de extensões fornecidos pelos três extensómetros parecem coincidir, o que era esperado face à localização dos sensores e à distribuição de esforços apresentada no Capítulo 3. Contudo, a Fig. 5.8 evidencia que o comportamento apresentado pelos três sensores ópticos não foi assim tão satisfatório. Nesta optou-se por representar a fase de descarga do segundo ciclo e o carregamento do terceiro, para evidenciar os problemas apresentados.

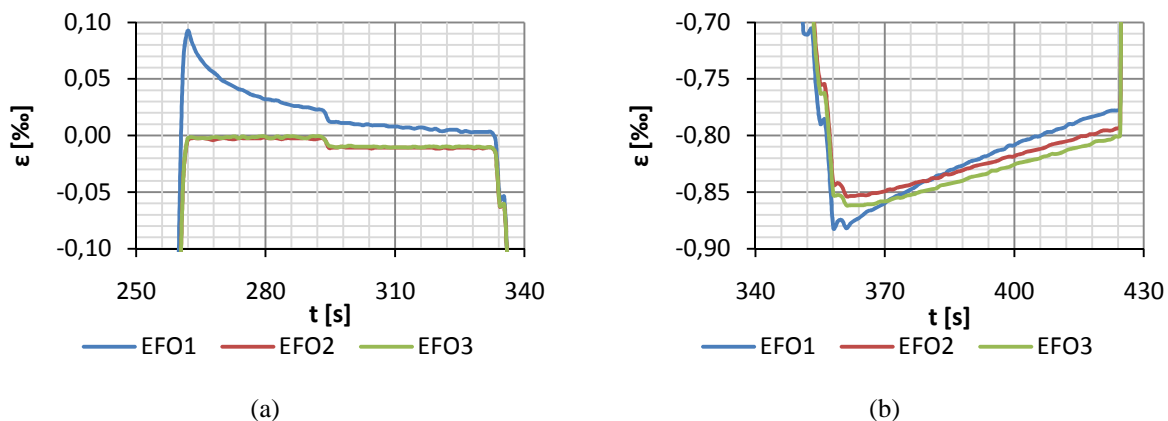


Fig. 5.8 – Problemas: a) Fase de descarga; b) Disparidade nas extensões para a carga máxima.

Consequentemente, há a salientar duas situações observadas no decorrer do sexto ensaio. A primeira diz respeito à fase de descarga de cada ciclo, onde o extensómetro da *WellTech* apresenta um comportamento bastante diferente daquele que seria de esperar. A segunda observação corresponde ao nível das extensões para o valor de carga máxima ser inicialmente superior no extensómetro EFO1 e ao fim de algum tempo passar a ser inferior.

Aquando da descarga da estrutura o sensor EFO1 não acompanha o seu comportamento, o que, à partida indica que este não se encontra devidamente solidarizado ao perfil HEB100. Com o tempo observa-se uma tendência para a extensão de tracção parasita diminuir lentamente para zero. Este facto corrobora a hipótese inicialmente avançada da raiz do problema estar na colagem do sensor à estrutura, uma vez que a transmissão das deformações da estrutura para o extensómetro é regida pela interface, a qual se assume como um terceiro elemento deformável, e influencia o desfasamento da resposta do sensor em relação à deformação real da viga.

A mesma explicação poderá estar na origem da diminuição de valores de extensão para uma força igual a 50kN. Relativamente à discrepância de valores obtidos para um nível de carga de 50kN entre o sensor EFO1 e EFO2 e EFO3, a razão poderá estar na sensibilidade indicada pela marca, a qual é mais baixa do que a dos sensores da *FiberSensing*. O valor de  $S_e$  referido pela *WellTech* poderá assim indicar uma deficiente transferência da deformação devido às diferentes interfaces envolvidas.

Deve ser referido que o processo de instalação do sensor EFO1 em nada diferiu da técnica de colagem dos sensores EFO2 e EFO3, contudo, por tratar-se de um sensor proveniente de um fabricante diferente, com características a nível de protecções da fibra também diferentes, tendo em consideração as características destas a colagem adoptada poderá não ter sido a melhor. Com vista a clarificar esta questão solicitou-se a colaboração da marca *WellTech*, para identificação das possíveis causas do mau comportamento do sensor EFO1. Expôs-se também a explicação anterior de modo a determinar a eventual possibilidade do problema residir no modo de fixação adoptado, e procurou-se esclarecer o motivo por detrás de um factor de sensibilidade inferior. A *WellTech* referiu que o sensor EFO1 é constituído por três camadas, sendo estas: a protecção primária, à base de produtos de acrilato, a bainha e por fim o núcleo, à semelhança do que foi exposto no ponto 2.5.2. Foi também adiantado que a colagem directa do *coating* à estrutura foi um erro, e que o sensor deveria ter sido fixado à estrutura por colagem directa da bainha, sendo que para isso era necessário remover o *coating* em dois pontos um de cada lado do sensor, à semelhança do sensor EFO2. Esta operação é vulgarmente designada como “abertura de janelas” e visa uma melhor e mais directa transferência de esforços. Porém, é bastante delicada e requer a utilização de equipamento específico, daí dever ser realizada aquando do fabrico do sensor, de modo a prevenir o risco de este ser danificado. Refere-se ainda que o problema pode não residir na colagem directa do *coating* à estrutura conforme referido pela marca, e sim numa deficiente adesão entre este e a fibra óptica aquando do processo de gravação da rede de *Bragg*, Fig. 2.19. Relativamente à sensibilidade à extensão foi referido um novo valor de 1,17pm/ $\mu\epsilon$ , contudo a própria marca não parece estar segura do mesmo.

Na Fig. 5.9 apresentam-se os cocientes entre as extensões medidas nos extensómetros EFO1, EFO2 e EFO3 e, uma vez mais, verifica-se que a única relação linear entre leituras é a dos sensores da *FiberSensing*. Nesta insere-se também uma regressão linear entre respostas de extensómetros de modo a poder comparar as diferenças entre estes sensores, visto o declive das referidas rectas permitir comparar o seu erro e desempenho. De facto, o desvio relaciona-se com o declive,  $m$ , das regressões lineares pela expressão (5.2).

$$\text{Desvio [\%]} = |1-m| \cdot 100 \quad (5.2)$$

Desta análise verifica-se que os sensores EFO2/EFO3 apresentam uma relação ideal, uma vez que o desvio é de apenas 1%, enquanto para os sensores EFO1/EFO2 e EFO1/EFO3 esse desvio é de 4% e 3%, respectivamente.

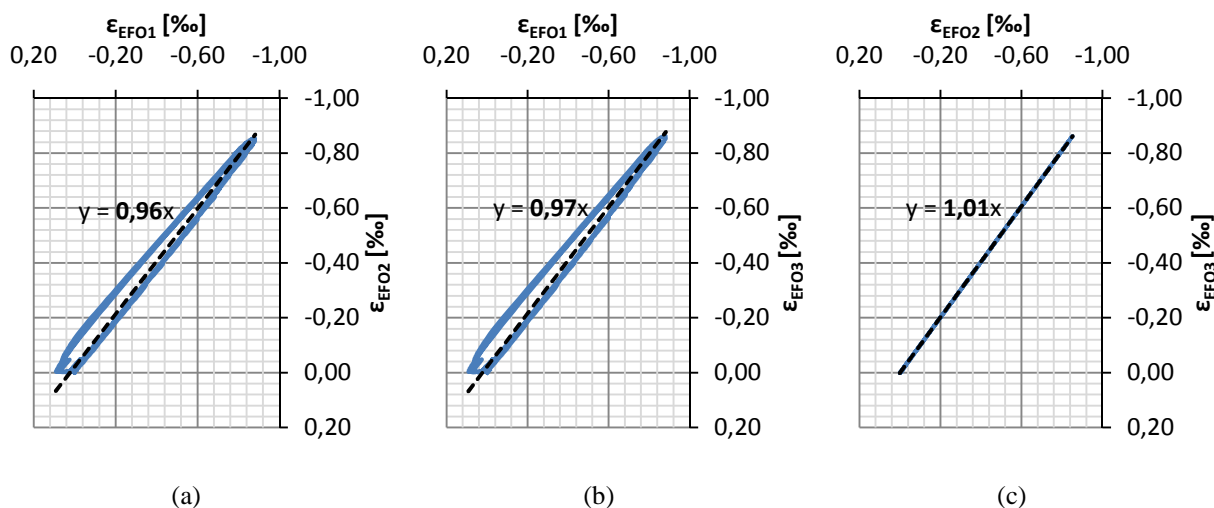


Fig. 5.9 – Relações entre extensómetros: a) EFO1/EFO2; b) EFO1/EFO3; c) EFO2/EFO3.

Finalmente, apresentam-se os valores de extensões para os diferentes sensores para cada carregamento realizado, bem como o valor de extensão equivalente caso a carga aplicada tivesse sido exactamente 50kN,  $\bar{\varepsilon}_{50}$ . Esta extensão é obtida por proporcionalidade directa entre os valores de força realmente transmitidas à viga e 50kN, visto com este sistema de carregamento não se conseguir garantir uma carga exacta deste último valor. Da análise do Quadro 5.2 verifica-se que o sensor EFO1 apresenta maior dispersão de extensões mediante o carregamento efectuado, quando comparado com os sensores EFO2 e EFO3. Relativamente ao valor médio, como seria de esperar o sensor EFO1 apresenta valores superiores pelos motivos anteriormente avançados. Relativamente ao erro dos extensómetros obtido deste estudo, o sensor EFO1 em relação ao extensómetro EFO3 apresenta um desvio relativo de 2,4%, enquanto o sensor EFO2 igualmente em relação a EFO3 apresenta um desvio relativo de apenas 1,0%, o que é sinónimo de uma resposta muito boa por parte dos dois tipos de sensores da *FiberSensing*.

Quadro 5.2 – Resumo de extensões nos extensómetros de fibra óptica.

| Sensor | Carregamento | $\varepsilon$ [%] | $\varepsilon_{50}$ [%] | $\bar{\varepsilon}_{50}$ [%] |
|--------|--------------|-------------------|------------------------|------------------------------|
| EFO1   | 1º           | -0,866            | -0,861                 |                              |
|        | 2º           | -0,848            | -0,852                 | -0,856                       |
|        | 3º           | -0,882            | -0,856                 |                              |
| EFO2   | 1º           | -0,833            | -0,828                 |                              |
|        | 2º           | -0,823            | -0,827                 | -0,828                       |
|        | 3º           | -0,853            | -0,828                 |                              |
| EFO3   | 1º           | -0,842            | -0,837                 |                              |
|        | 2º           | -0,831            | -0,835                 | -0,836                       |
|        | 3º           | -0,861            | -0,836                 |                              |

#### 5.2.4. COMPARAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS E DE FIBRA ÓPTICA

Após comparar os resultados obtidos nos diferentes sensores de *Bragg*, procura-se estabelecer a relação entre estes e o sensor eléctrico instalado, cujas medições serão consideradas como de referência para estudar o desvio que os extensómetros EFO2 e EFO3 apresentam. É importante salientar que tal só foi possível uma vez que os sistemas de aquisição utilizados para interrogar o sensor eléctrico e os sensores ópticos o fizeram com a mesma frequência de aquisição, 1 leitura por segundo. Deste modo, tornou-se possível sobrepor as Fig. 5.5 e Fig. 5.7 de forma a obter o gráfico da Fig. 5.10.

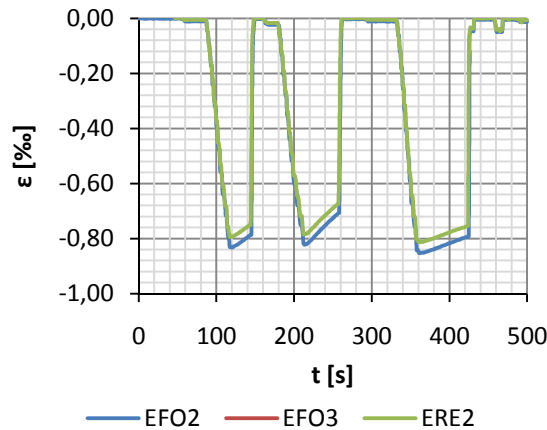


Fig. 5.10 – Medições com extensómetros da *Fiber Sensing* e extensómetro eléctrico.

De seguida, de modo a poder avaliar o desvio em relação ao extensómetro de referência, analisou-se a relação tensão/extensão de cada um dos sensores em causa. O extensómetro de resistência eléctrica, representado a verde nas Fig. 5.11, Fig. 5.12 e Fig. 5.13, apresenta uma relação bastante estável e linear entre o nível de tensão instalada e a deformação da estrutura, enquanto os sensores ópticos, representados a azul e vermelho, pese embora exibam também proporcionalidade entre as duas grandezas são na realidade bastante mais sensíveis ao facto do sistema de carregamento ser manual. Verifica-se assim uma maior dispersão do desvio relativo entre os sensores ópticos e o sensor eléctrico de referência, dispersão essa que tende a diminuir com o aumento de carga aplicada ao demonstrador, conforme os segundos gráficos das Fig. 5.11, Fig. 5.12 e Fig. 5.13 exibem. Foi assim necessário aproximar uma função polinomial a estes de modo a poder avaliar o valor de desvio relativo.

Deve ser referido que os pontos obtidos para níveis de tensão reduzidos não traduzem verdadeiramente a diferença de extensões entre os sensores ópticos e o eléctrico. Este ensaio é apenas conclusivo para análises de desvios relativos dos sensores de *Bragg* para carga máxima e comparação destes dois sensores entre si. As conclusões retiradas foram que o sensor EFO2 se encontra ligeiramente mais próximo do sensor eléctrico do que o sensor EFO3, dados os desvios relativos destes serem aproximadamente 5% e 6% respectivamente. Deve também salientar-se que não se considera que o sensor eléctrico esteja mais correcto do que os sensores ópticos. Este serviu apenas de referência ao estudo conduzido.

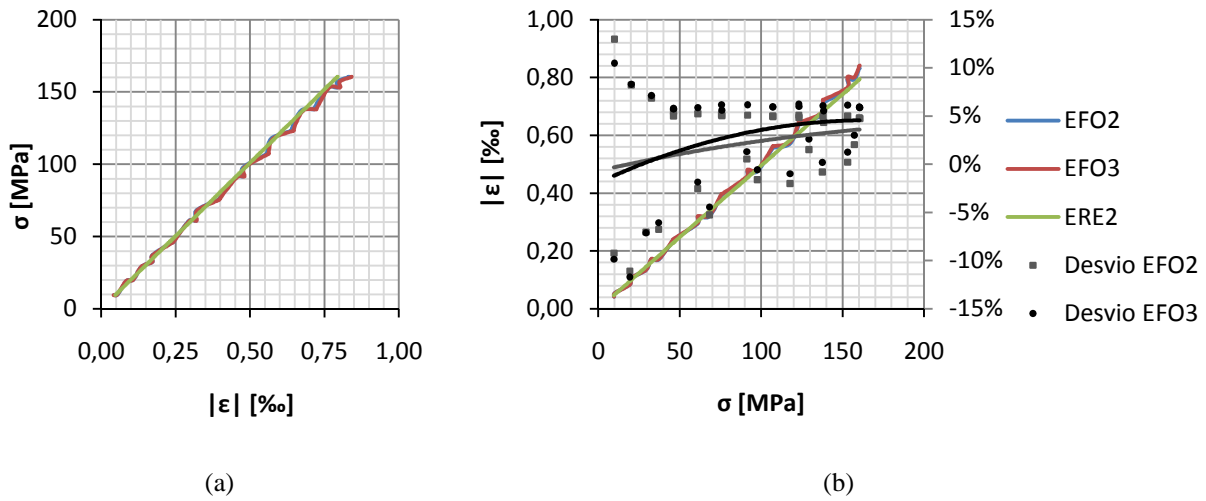


Fig. 5.11 – 1º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos.

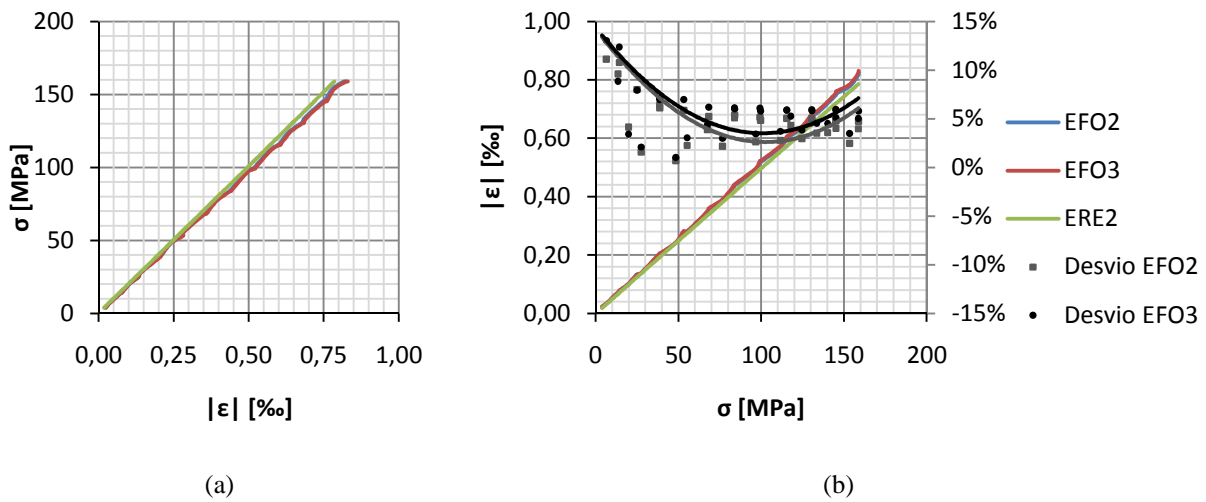


Fig. 5.12 – 2º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos.

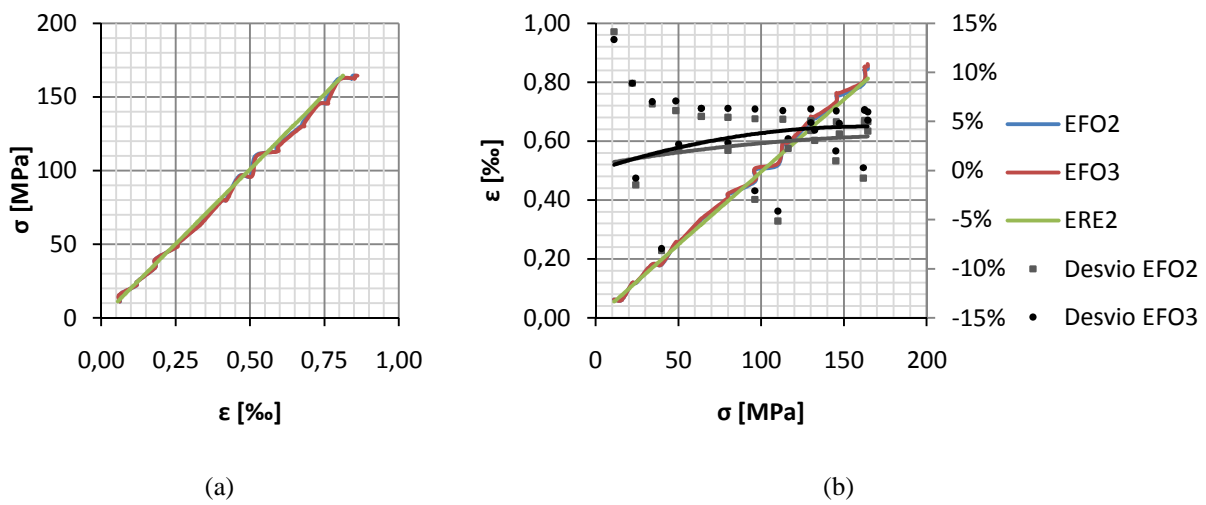


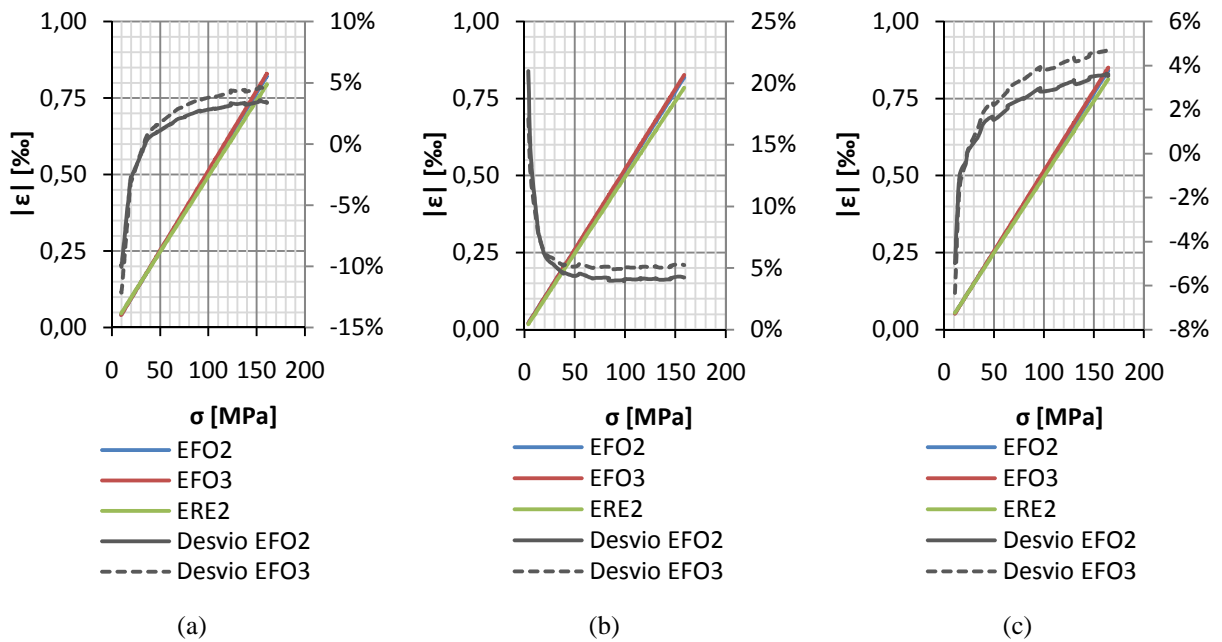
Fig. 5.13 – 3º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos.

Quadro 5.3 – Resumo de extensões nos extensómetros ópticos e eléctrico.

| Sensor          | Carregamento | $\epsilon$ [‰] | $\epsilon_{50}$ [‰] | $\overline{\epsilon}_{50}$ [‰] |
|-----------------|--------------|----------------|---------------------|--------------------------------|
| ERE2            | 1º           | -0,795         | -0,790              |                                |
|                 | 2º           | -0,785         | -0,789              | -0,789                         |
|                 | 3º           | -0,813         | -0,789              |                                |
| EFO2            | 1º           | -0,833         | -0,828              |                                |
|                 | 2º           | -0,823         | -0,827              | -0,828                         |
|                 | 3º           | -0,853         | -0,828              |                                |
| Desvio Relativo |              |                |                     | 4,8%                           |
| EFO3            | 1º           | -0,842         | -0,837              |                                |
|                 | 2º           | -0,831         | -0,835              | -0,836                         |
|                 | 3º           | -0,861         | -0,836              |                                |
| Desvio Relativo |              |                |                     | 5,9%                           |

Concluindo, inclui-se um segundo estudo realizado, o qual consistiu em aproximar aos dados obtidos no sistema de aquisição óptico um comportamento linear e deste obter o desvio relativo ao sensor eléctrico. Isto é, efectuou-se o raciocínio inverso ao exposto anteriormente.

Deste obtiveram-se erros ligeiramente inferiores conforme as Fig. 5.14 demonstra, contudo, na opinião do autor, este raciocínio não é tão fidedigno pelo rigor da regressão linear realizada não ser o melhor e porque as extensões comparadas com as do sensor eléctrico não são reais.



### 5.3. ENSAIO ESTÁTICO 7

A secção instrumentada neste ensaio é novamente a Secção S1, sendo que a rede de sensores instalada na mesma é igual à que foi analisada no Ensaio Estático 6. Conforme referido no Quadro 3.3, os objectivos deste ensaio são em tudo semelhantes aos do ensaio anterior, contudo a diferença está no facto de no Ensaio Estático 7 a rede de sensores instalada estar solicitada à tracção. Para tal foi necessário apenas rodar o perfil metálico, o que resultou numa nova posição dos extensómetros: os sensores ópticos estão agora localizados na aba da direita, enquanto o sensor eléctrico na da esquerda.

Relativamente ao esquema de carregamento do procedimento laboratorial este consiste num conjunto de três ciclos de carga dos 0kN aos 50kN, tal como a Fig. 5.15 ilustra.

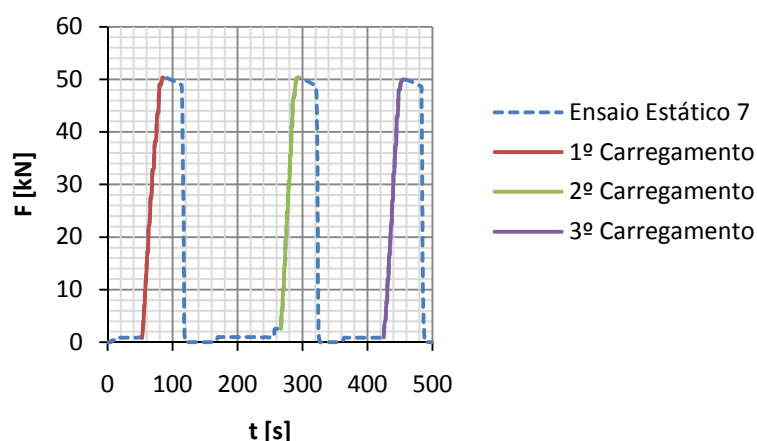


Fig. 5.15 – Ensaio Estático 7.

#### 5.3.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS

A medição do sinal fornecido pelo extensómetro eléctrico ERE2 não carece de qualquer explicação adicional, uma vez que esta questão foi debatida no Capítulo 4. Deste modo, apresentam-se a Fig. 5.16 e Fig. 5.17 as quais ilustram o sinal de saída  $\Delta B_{out}$  ao longo do tempo e em relação à força, e suas consequentes conversões em extensão segundo a expressão (4.1).

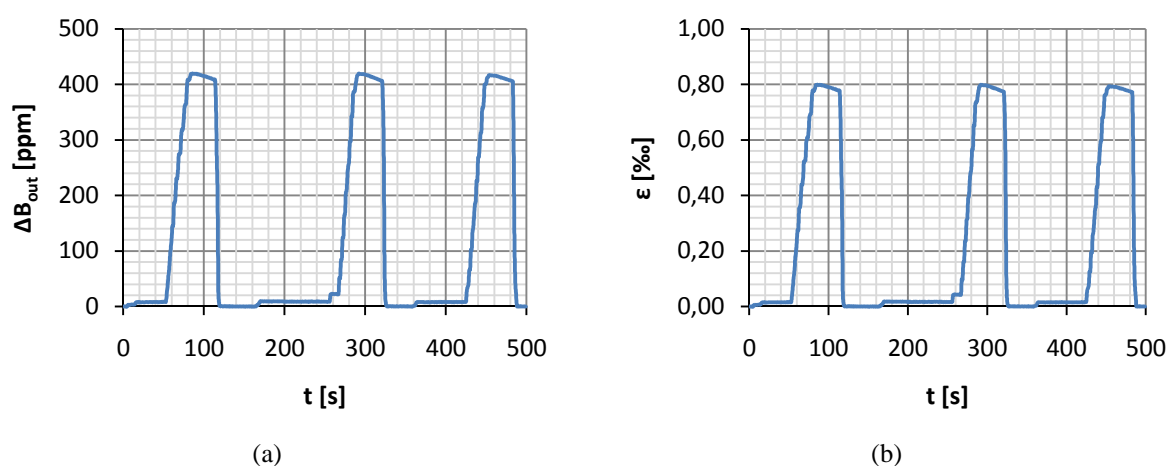


Fig. 5.16 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão.

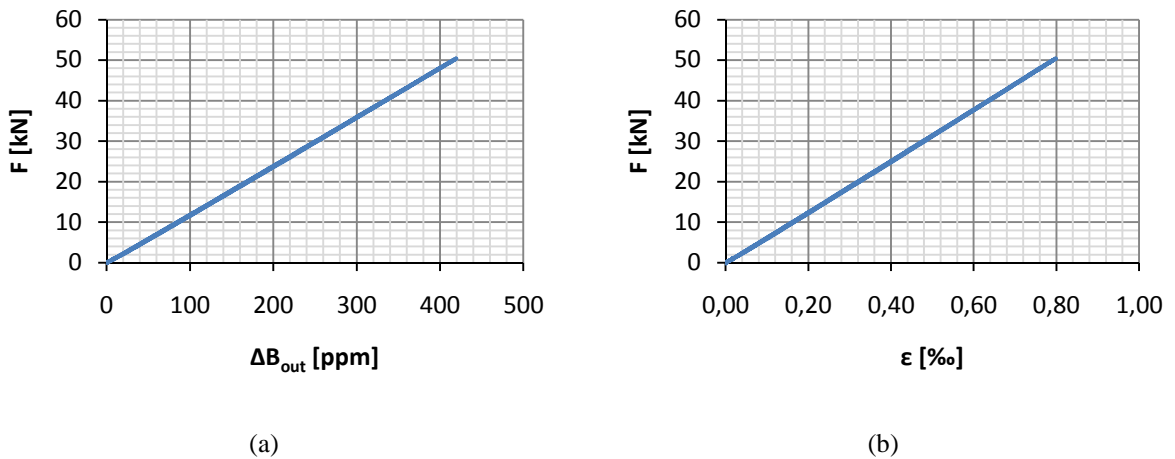


Fig. 5.17 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão.

### 5.3.2. MEDIÇÕES COM EXTENSÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA

De acordo com o que foi enunciado tanto no Capítulo 2 de introdução às redes de sensores de fibra óptica, como no Ensaio Estático 6, aquando das primeiras medições realizadas com esta tecnologia, apresentam-se na Fig. 5.18 as medições com os sensores de *Bragg* em relação ao tempo, e conseqüente conversão da variação do comprimento de onda em variação de extensão segundo a expressão (5.1). Os valores de  $\lambda_0$  apresentados no ensaio anterior permanecem válidos, bem como os de sensibilidade.

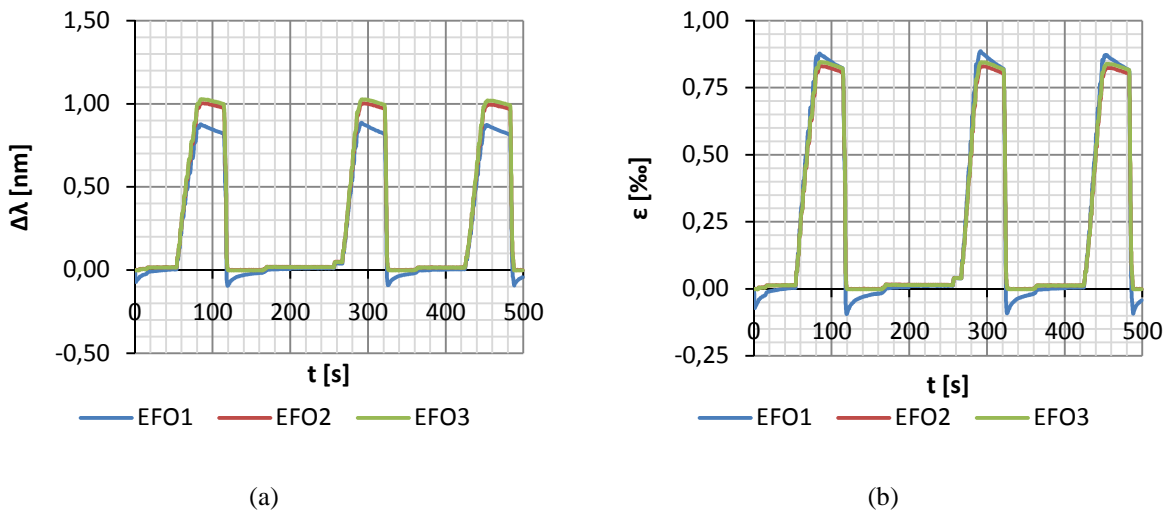


Fig. 5.18 – Medições com EFO: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão.

### 5.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS EXTENSÓMETROS EM FIBRA ÓPTICA

Após no ensaio anterior se ter verificado que a interface do extensómetro EFO1 se encontrava em más condições, facto que originou a deturpação dos resultados obtidos, espera-se que o seu comportamento neste ensaio também não seja satisfatório quando submetido a deformações de tracção.

De facto na Fig. 5.18 verifica-se que a após a descarga da estrutura as extensões deste sensor não são nulas e que para os três ciclos de carga o valor máximo lido por este é superior aos dos restantes

sensores de *Bragg*. Estes dois problemas verificados encontram-se representados com maior nível de pormenorização na Fig. 5.19, na qual se ilustra a título exemplificativo a fase de descarga do segundo ciclo e o carregamento deste mesmo ciclo, respectivamente.

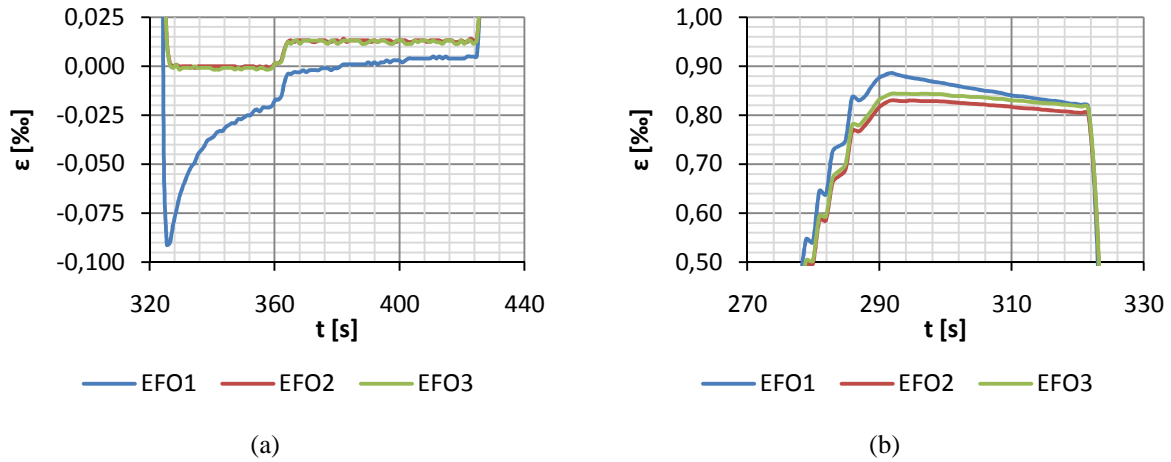


Fig. 5.19 – Problemas: a) Fase de descarga; b) Disparidade extensões para carga máxima.

Na fase de descarga da estrutura o sensor EFO1 não acompanha da mesma forma o comportamento desta, o que corrobora as conclusões retiradas no ensaio anterior. Este não se encontra devidamente solidarizado ao perfil metálico visto a interface entre estes dois elementos não funcionar devidamente. Tal, segundo o fabricante, deve-se ao facto de se ter colado directamente à estrutura o *coating* do sensor e este não ser um elemento rígido.

Apresentam-se à semelhança do que foi feito anteriormente a Fig. 5.20, a qual contém as relações entre extensões medidas nos extensómetros EFO1, EFO2 e EFO3, bem como as regressões lineares aproximadas à resposta dos mesmos. Conclui-se uma vez mais, que a única relação linear entre leituras é a dos sensores da *FiberSensing*, tendo esta um desvio da ordem dos 2%.

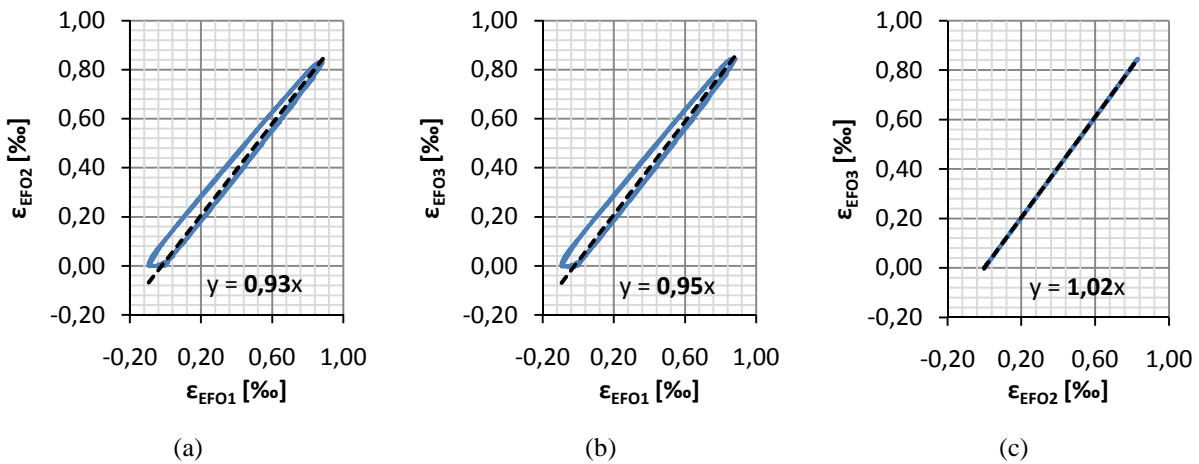


Fig. 5.20 – Relações entre extensómetros: a) EFO1/EFO2; b) EFO1/EFO3; c) EFO2/EFO3.

No Quadro 5.4, apresentam-se os valores de extensões dos diferentes sensores para cada carregamento realizado. Nesta inclui-se também o valor de extensão equivalente caso a carga aplicada tivesse sido exactamente 50kN,  $\bar{\varepsilon}_{50}$ . Verifica-se que o sensor EFO1 apresenta maior dispersão de extensões mediante o carregamento efectuado, quando comparado com os sensores EFO2 e EFO3. No que concerne ao valor médio, o sensor EFO1 apresenta extensões mais elevadas, o que é validado pela Fig.

5.19b). Relativamente ao desvio entre o sensor da *WellTech* em relação ao sensor EFO2, o desvio obtido foi de 5,6%, enquanto entre sensores da *FiberSensing* este é de apenas 1,8%.

Quadro 5.4 – Resumo de extensões nos extensómetros de fibra óptica.

| Sensor | Carregamento | $\varepsilon$ [‰] | $\varepsilon_{50}$ [‰] | $\bar{\varepsilon}_{50}$ [‰] |
|--------|--------------|-------------------|------------------------|------------------------------|
| EFO1   | 1º           | 0,875             | 0,869                  | 0,870                        |
|        | 2º           | 0,879             | 0,873                  |                              |
|        | 3º           | 0,868             | 0,868                  |                              |
| EFO2   | 1º           | 0,830             | 0,824                  | 0,824                        |
|        | 2º           | 0,829             | 0,823                  |                              |
|        | 3º           | 0,823             | 0,823                  |                              |
| EFO3   | 1º           | 0,845             | 0,839                  | 0,839                        |
|        | 2º           | 0,844             | 0,839                  |                              |
|        | 3º           | 0,838             | 0,838                  |                              |

#### 5.3.4. COMPARAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS E DE FIBRA ÓPTICA

Conforme o nome deste ponto indica, importa comparar os resultados obtidos nos diferentes sensores de *Bragg* e o extensómetro eléctrico ERE2. Procura-se estabelecer a relação entre estes, sendo que as medições do sensor ERE2 serão consideradas como de referência para estudar o desvio que os extensómetros EFO2 e EFO3 apresentam. Apresenta-se o gráfico da Fig. 5.21, o qual contém as medições de extensões em relação ao tempo dos três sensores em estudo.

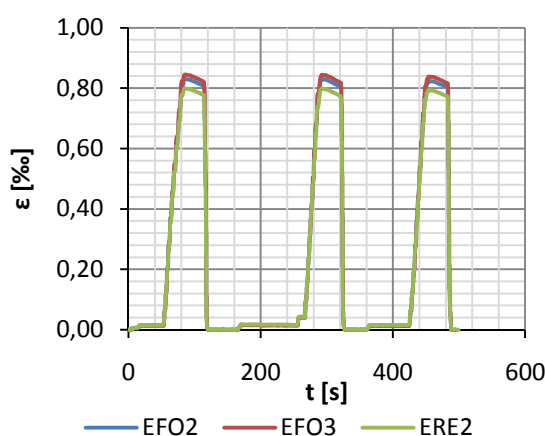


Fig. 5.21 – Medições com extensómetros da *Fiber Sensing* e extensómetro eléctrico.

Seguidamente, de modo a averiguar qual o desvio relativo de EFO2 e EFO3 analisou-se a relação tensão/extensão de cada um dos sensores em causa tendo e aproximou-se uma função polinomial a estes de modo a avaliar o valor de erro. À semelhança do ensaio à compressão, o sensor EFO3 apresenta um desvio relativo superior ao sensor EFO2, nomeadamente 6% e 4%, respectivamente.

As Fig. 5.22, Fig. 5.23, Fig. 5.24 apresentam a variação desse mesmo desvio, e, de forma a sintetizar a informação obtida dos diferentes carregamentos, apresenta-se o Quadro 5.5. Não se inclui neste ponto os gráficos relativos ao segundo processo de análise de erro dos sensores ópticos face ao sensor eléctrico de referência pelos motivos anteriormente expostos.

Quadro 5.5 – Resumo de extensões nos extensómetros ópticos e eléctrico.

| Sensor          | Carregamento | $\epsilon$ [‰] | $\epsilon_{50}$ [‰] | $\overline{\epsilon_{50}}$ [‰] |
|-----------------|--------------|----------------|---------------------|--------------------------------|
| ERE2            | 1º           | 0,798          | 0,793               |                                |
|                 | 2º           | 0,799          | 0,793               | 0,793                          |
|                 | 3º           | 0,792          | 0,793               |                                |
| EFO2            | 1º           | 0,830          | 0,824               |                                |
|                 | 2º           | 0,830          | 0,825               | 0,824                          |
|                 | 3º           | 0,823          | 0,823               |                                |
| Desvio Relativo |              |                |                     | 3,9%                           |
| EFO3            | 1º           | 0,845          | 0,839               |                                |
|                 | 2º           | 0,844          | 0,838               | 0,838                          |
|                 | 3º           | 0,838          | 0,838               |                                |
| Desvio Relativo |              |                |                     | 5,7%                           |

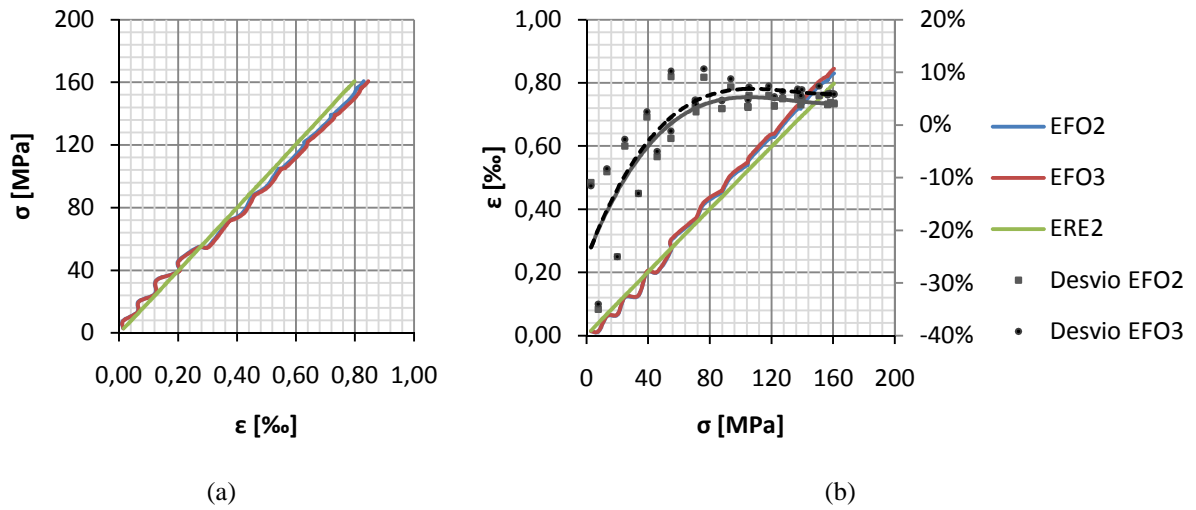


Fig. 5.22 – 1º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos.

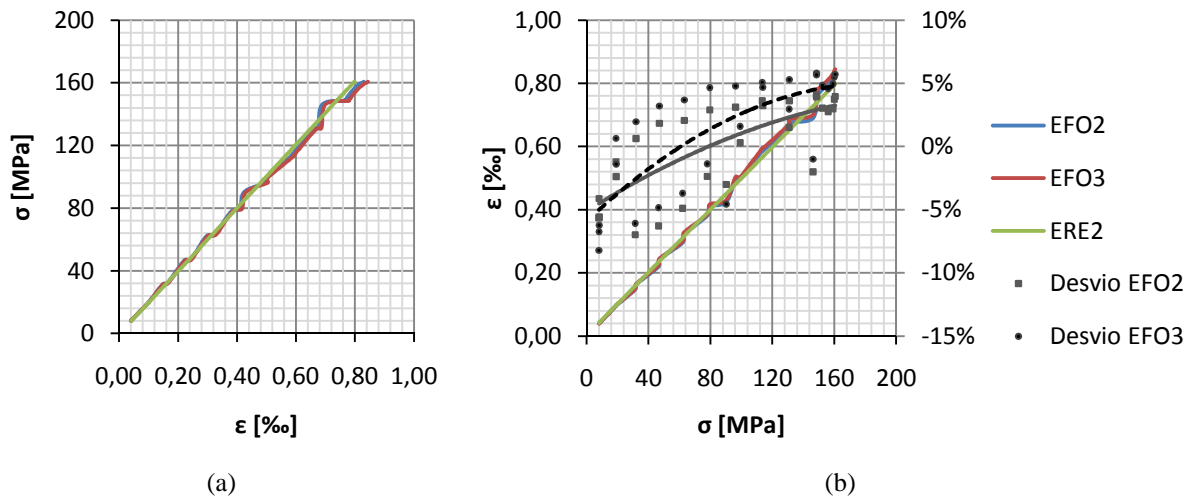


Fig. 5.23 – 2º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos.

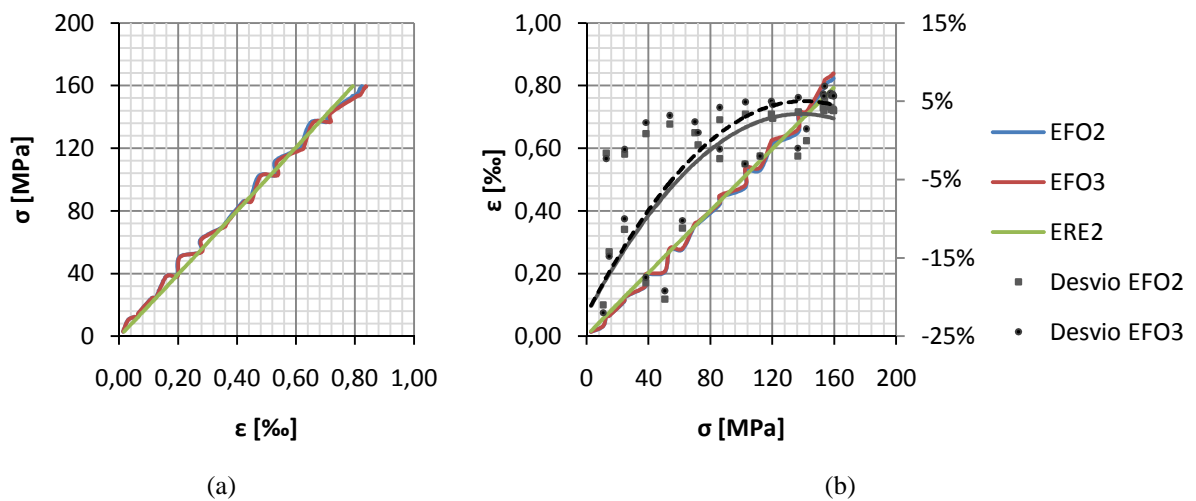


Fig. 5.24 – 3º Carregamento: a) Relação tensão/extensão; b) Desvios dos sensores ópticos.

## 5.4. ENSAIO ESTÁTICO 8

O Ensaio Estático 8 é o primeiro ensaio estático realizado por patamares em que a rede de sensores instalada é constituída por sensores ópticos baseados na modulação do comprimento de onda. O facto de se introduzir aqui este ensaio prende-se com o objectivo de estudar como é que estes sensores se comportam quando submetidos a níveis de carga constantes ao longo do tempo e poder avaliar o seu desvio para níveis baixos de carga, uma vez que os procedimentos laboratoriais anteriormente adoptados não o permitiram.

Assim, este ensaio foi uma vez mais conduzido com a viga metálica rodada relativamente à sua posição original apresentada no Capítulo 3, visto que a resposta dada pelos sensores ópticos e eléctricos em ambos os casos de compressão e tracção é semelhante.

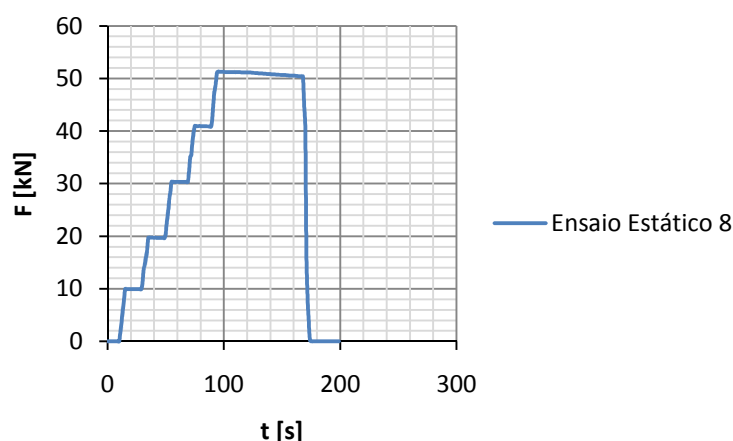


Fig. 5.25 – Ensaio Estático 8.

### 5.4.1. MEDIÇÕES DE EXTENSÕES COM EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS

Apresentam-se a Fig. 5.26 e Fig. 5.27 que representam o sinal de saída  $\Delta B_{out}$  ao longo do tempo e em relação à força aplicada. Nestas inclui-se também as consequentes conversões de sinal em extensão segundo a expressão (4.1).

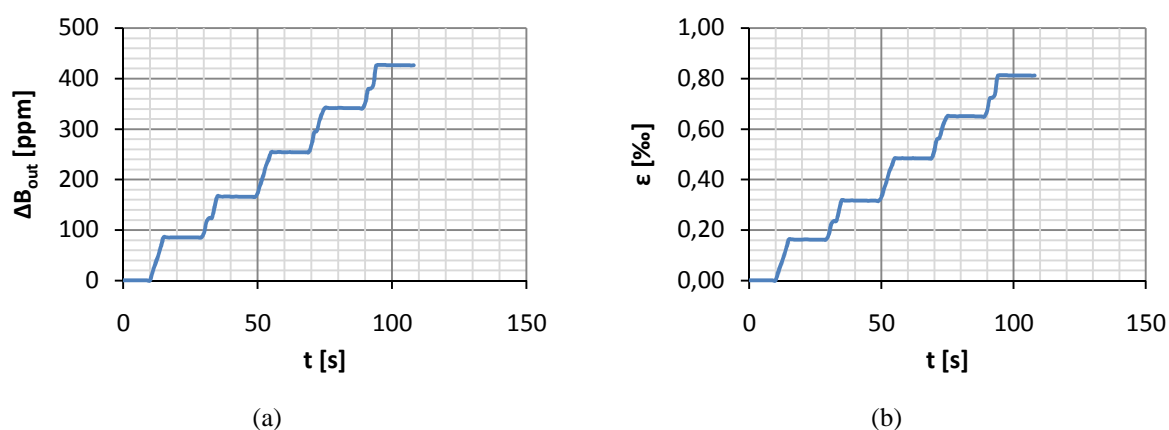


Fig. 5.26 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão.

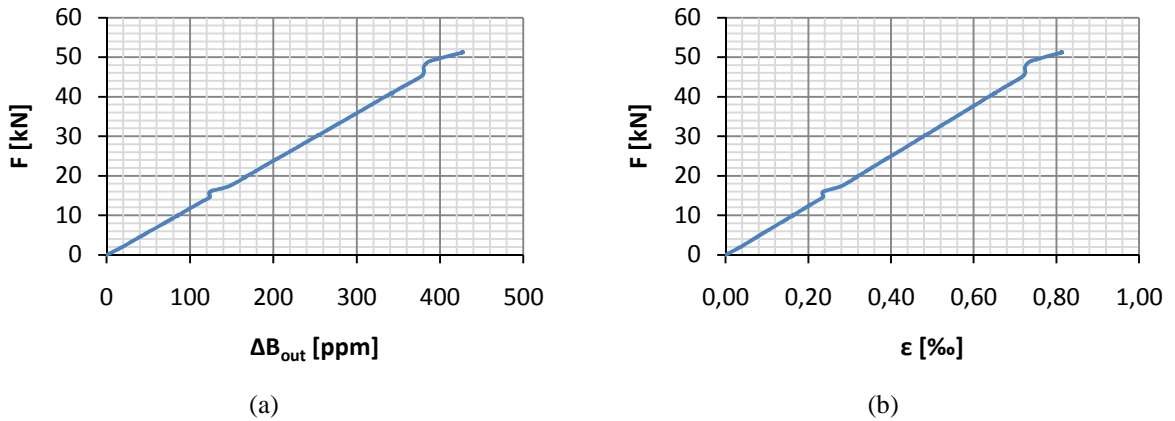


Fig. 5.27 – Medições com ERE2: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão.

#### 5.4.2. MEDIÇÕES COM EXTENSÓMETROS DE FIBRA ÓPTICA

De acordo com o que foi referido na teoria das redes de sensores de fibra óptica e no Ensaio Estático 6 do presente capítulo apresentam-se as medições com os sensores de *Bragg* em relação ao tempo, e consequente conversão da variação do comprimento de onda em variação de extensão segundo a expressão (5.1), Fig. 5.28. Na utilização da expressão (5.1) os valores de  $\lambda_0$  e  $S_\epsilon$  são rigorosamente os mesmos dos apresentados no Quadro 5.1 dado estes serem características intrínsecas do sensor, não dependendo portanto do ensaio a realizar. De salientar que a Fig. 5.28 não inclui a fase de descarga da estrutura, uma vez que os dados a avaliar dizem respeito unicamente aos adquiridos nos diferentes patamares.

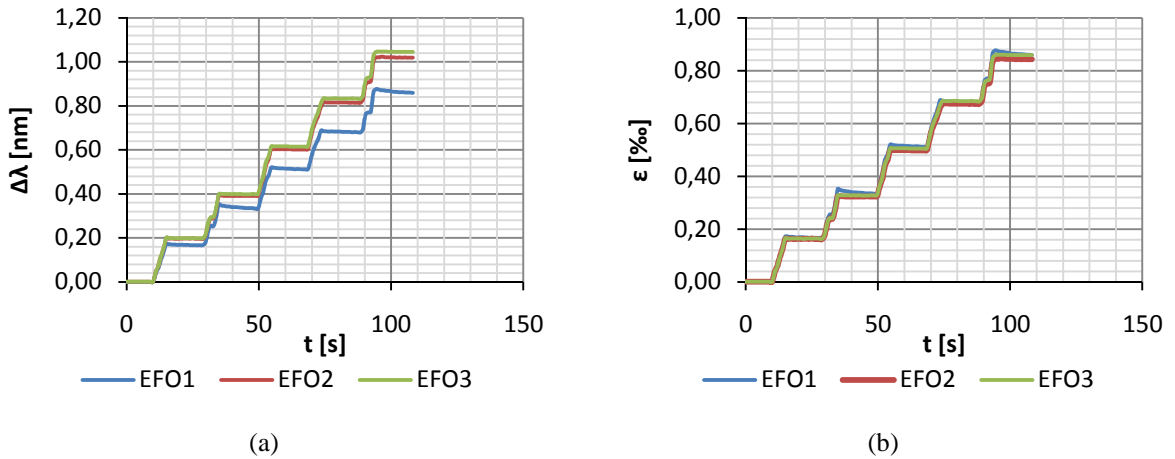


Fig. 5.28 – Medições com EFO: a) variação do sinal de saída; b) conversão em extensão.

### 5.4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS EXTENSÓMETROS EM FIBRA ÓPTICA

Uma vez mais comprovou-se que devido à má colagem do sensor EFO1, ou má aderência entre o *coating* e a rede de *Bragg* deste, a informação retirada do ensaio não permite comparar o seu desempenho com os restantes sensores instalados.

Na Fig. 5.28 é evidente a diminuição da variação de comprimento de onda para um nível de tensão aplicada uniforme. Consequentemente o nível de extensão tende também a diminuir com o tempo no sensor da *WellTech* dando-se o caso da duração do patamar ser tal que imediatamente antes de se iniciar um novo incremento de carga o nível de extensão medido nos três sensores é praticamente o mesmo, Fig. 5.29a). Assim, o valor médio de extensão por patamar será superior ao valor médio de extensão lido nos sensores da *FiberSensing* o que faz com que novamente o sensor EFO1 não possa ser alvo de comparação futura com o sensor eléctrico. O segundo problema levantado na Fig. 5.29 é em tudo semelhante ao que foi já debatido nos ensaios estáticos 6 e 7, contudo este não influencia as avaliações dos sensores, a realizar futuramente.

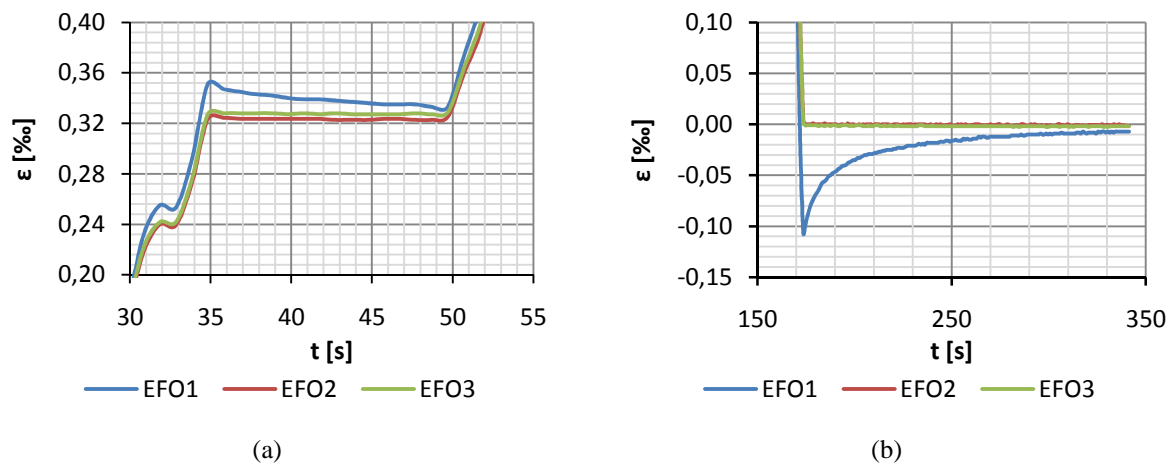


Fig. 5.29 – Problemas: a) Disparidade de valores nos patamares; b) Fase de descarga.

Apresentam-se à semelhança do que foi feito anteriormente a Fig. 5.30, a qual contém as relações entre extensões medidas nos extensómetros EFO1, EFO2 e EFO3. Conclui-se uma vez mais, que a única relação linear entre leituras é a dos sensores da *FiberSensing*, com um desvio de 2%.

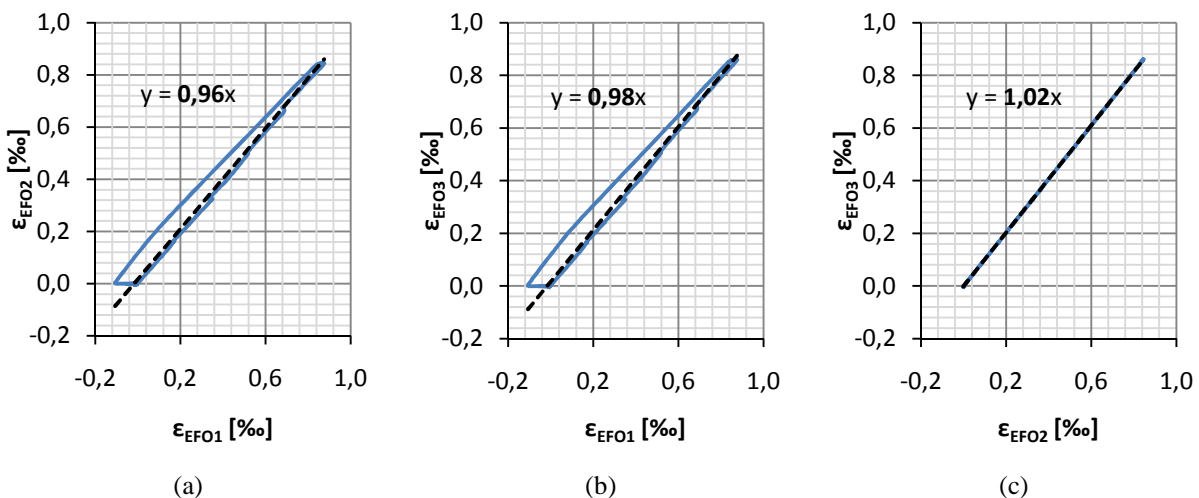


Fig. 5.30 – Relações entre extensómetros: a) EFO1/EFO2; b) EFO1/EFO3; c) EFO2/EFO3.

Os valores de extensões para os diferentes sensores para cada nível de carga, bem como o valor de extensão equivalente caso a carga aplicada tivesse tido exactamente o valor que se procurava obter,  $\bar{\epsilon}_x$ , encontram-se presentes no Quadro 5.6. Conforme referido anteriormente o nível médio de extensão do sensor EFO1 é superior em todos os patamares quando comparado com os extensómetros EFO2 e EFO3. Por outro lado, comparando os sensores da *FiberSensing* a diferença entre os valores médios de extensão por patamar é sucessivamente maior consoante aumenta também a carga aplicada à viga. Numa primeira fase, para uma força de 10kN a diferença é de apenas 0,001%, enquanto no último patamar esta ascende aos 0,014%, valor já considerado significativo.

Quadro 5.6 – Resumo de extensões nos extensómetros de fibra óptica.

| Patamar | $F_{real}$ [kN] | Sensor | $\bar{\epsilon}$ [%] | $\bar{\epsilon}_x$ [%] |
|---------|-----------------|--------|----------------------|------------------------|
| 10kN    | 9,93            | EFO1   | 0,168                | 0,169                  |
|         |                 | EFO2   | 0,163                | 0,164                  |
|         |                 | EFO3   | 0,164                | 0,165                  |
| 20kN    | 19,70           | EFO1   | 0,340                | 0,345                  |
|         |                 | EFO2   | 0,323                | 0,328                  |
|         |                 | EFO3   | 0,328                | 0,332                  |
| 30kN    | 30,33           | EFO1   | 0,514                | 0,509                  |
|         |                 | EFO2   | 0,499                | 0,493                  |
|         |                 | EFO3   | 0,506                | 0,500                  |
| 40kN    | 40,93           | EFO1   | 0,683                | 0,667                  |
|         |                 | EFO2   | 0,675                | 0,660                  |
|         |                 | EFO3   | 0,685                | 0,670                  |
| 50kN    | 51,25           | EFO1   | 0,865                | 0,844                  |
|         |                 | EFO2   | 0,844                | 0,824                  |
|         |                 | EFO3   | 0,859                | 0,838                  |

#### 5.4.4. COMPARAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS E DE FIBRA ÓPTICA

O estudo comparativo de extensões entre os sensores ópticos EFO2 e EFO3 e eléctrico ERE2 apresenta-se sob a forma de gráficos de extensão em função do tempo por patamares. Apresenta-se o conjunto de leituras realizado em cada nível de carga e a estas é aproximada uma recta que traduz o seu valor médio. Conforme foi referido anteriormente, para esta análise comparativa poder ser realizada houve que configurar os sistemas de aquisição envolvidos no ensaio para interrogarem a rede de sensores com a mesma frequência. Consequentemente, por sobreposição das medições de extensões é possível obter a Fig. 5.31 e isolar os seus patamares, Fig. 5.32, Fig. 5.33 e Fig. 5.34.

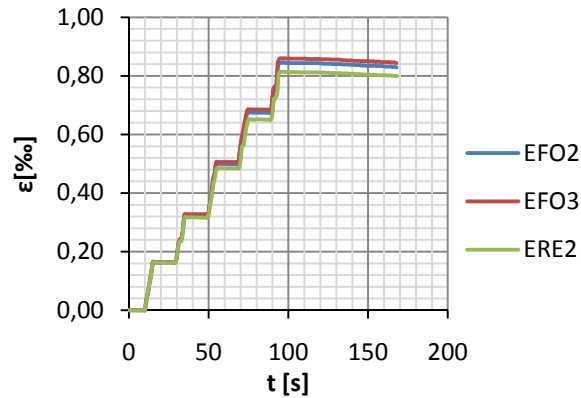


Fig. 5.31 – Medições com extensómetros da *Fiber Sensing* e extensómetro eléctrico.

O objectivo deste ensaio consistia em determinar o desvio das extensões lidas nos sensores ópticos em relação ao sensor eléctrico, uma vez que, nos ensaios cíclicos anteriores, os valores de desvio relativo para cargas mais reduzidas apresentavam uma elevada disparidade.

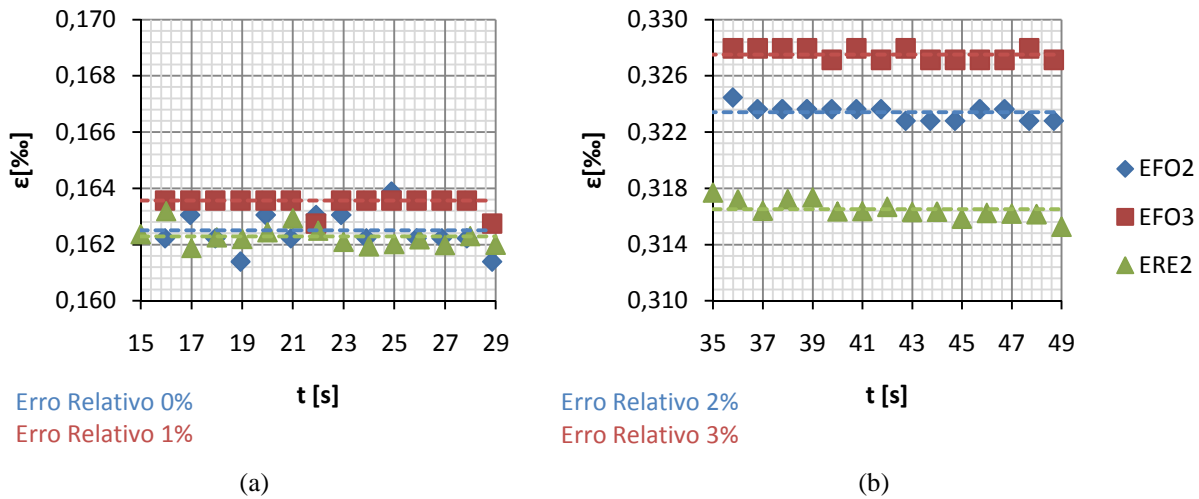


Fig. 5.32 – Desvios dos sensores ópticos: a) Patamar 10kN; b) Patamar 20kN.

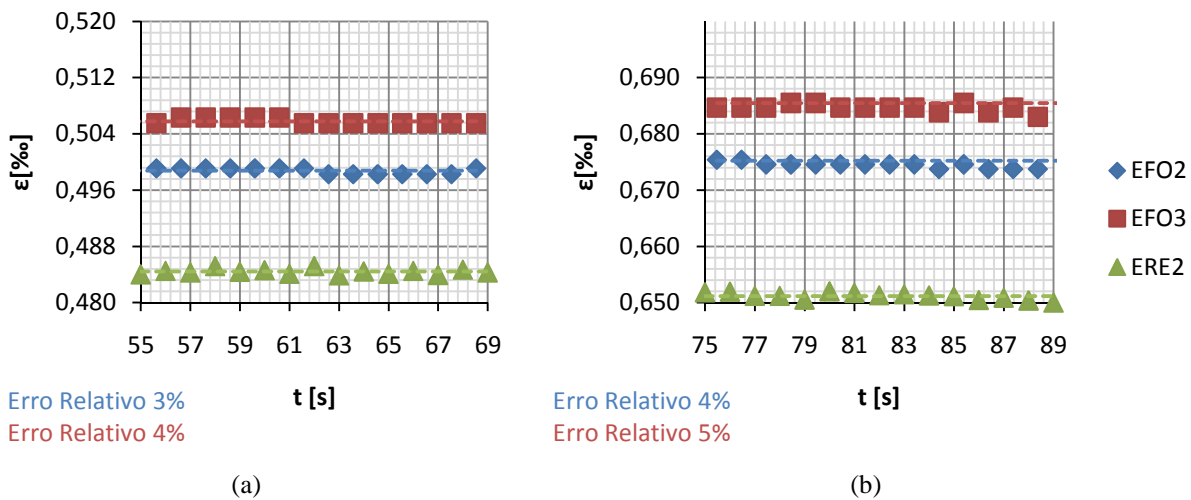
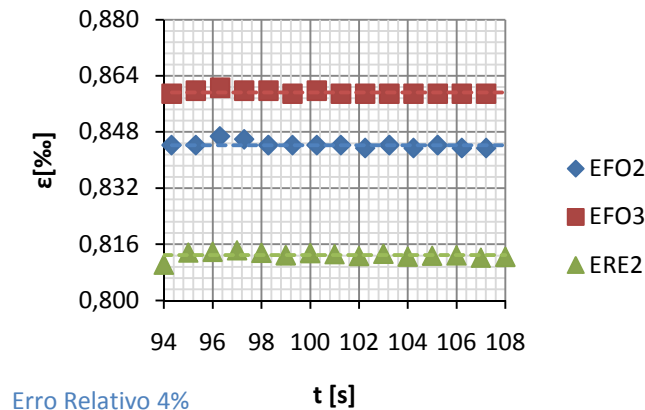


Fig. 5.33 – Desvios dos sensores ópticos: a) Patamar 30kN; b) Patamar 40kN.



Erro Relativo 4%  
 Erro Relativo 6%

Fig. 5.34 – Desvios dos sensores ópticos: Patamar 50kN.

Verifica-se que para 50kN o erro é de 4% e 6% para o sensor EFO2 e EFO3, respectivamente, valores que vão de encontro aos anteriormente avançados no Ensaio Estático 7. Contudo, para uma força de 10kN não há praticamente diferença entre as extensões lidas nos três sensores, diferença essa que aumenta proporcionalmente com o aumento do nível de carga. De referir que uma vez mais os valores obtidos nos sensores ópticos foram superiores ao do sensor eléctrico.

As extensões medidas neste ensaio, que posteriormente irão ser comparadas com o modelo numérico da estrutura, encontram-se resumidas no Quadro 5.7 e representadas sob a forma gráfica na Fig. 5.35.

Quadro 5.7 – Resumo de extensões nos extensómetros ópticos e eléctrico.

| Patamar | $F_{\text{real}}$ [kN] | Sensor | $\bar{\epsilon}$ [%] | $\bar{\epsilon}_x$ [%] |
|---------|------------------------|--------|----------------------|------------------------|
| 10kN    | 9,93                   | EFO2   | 0,163                | 0,164                  |
|         |                        | EFO3   | 0,164                | 0,165                  |
|         |                        | ERE2   | 0,162                | 0,163                  |
| 20kN    | 19,70                  | EFO2   | 0,323                | 0,328                  |
|         |                        | EFO3   | 0,328                | 0,332                  |
|         |                        | ERE2   | 0,317                | 0,321                  |
| 30kN    | 30,33                  | EFO2   | 0,499                | 0,493                  |
|         |                        | EFO3   | 0,506                | 0,500                  |
|         |                        | ERE2   | 0,484                | 0,479                  |
| 40kN    | 40,93                  | EFO2   | 0,675                | 0,660                  |
|         |                        | EFO3   | 0,685                | 0,670                  |
|         |                        | ERE2   | 0,651                | 0,636                  |
| 50kN    | 51,25                  | EFO2   | 0,844                | 0,824                  |
|         |                        | EFO3   | 0,859                | 0,838                  |
|         |                        | ERE2   | 0,813                | 0,793                  |

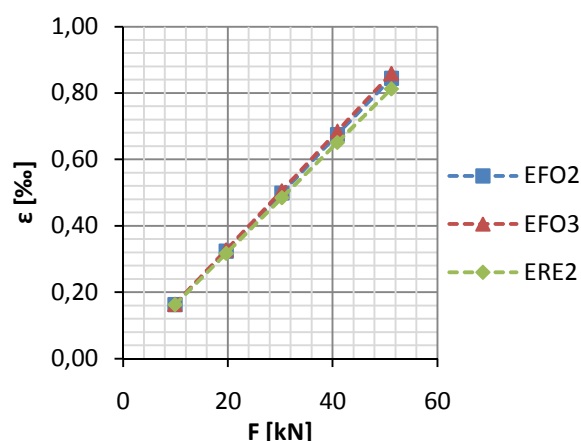


Fig. 5.35 – Resumo de extensões médias nos extensómetros ópticos e eléctrico.

Por último interessa averiguar o desvio entre os sensores da *FiberSensing* de modo a verificar se este é constante e independente da carga aplicada. O Quadro 5.8 evidencia que o comportamento destes dois sensores é linear, pese embora o valor de desvio obtido para o primeiro patamar venha contrariar esta conclusão. Contudo, face ao que foi exposto já noutras secções deste trabalho, para valores baixos de carga os valores obtidos no sistema de monitorização não são tão fiáveis.

Procurando manter constante a força aplicada à estrutura durante um determinado intervalo de tempo, de forma a perceber de uma forma mais exacta a evolução do nível de extensões na estrutura, o que no ensaio anterior não havia sido conseguido face à elevada sensibilidade dos sensores ópticos ao sistema de carregamento manual, conclui-se assim o estudo dos extensómetros ópticos.

Quadro 5.8 – Desvios relativos entre sensores da *FiberSensing*.

| Patamar | Desvio Relativo [%] |
|---------|---------------------|
| 10kN    | 0,6                 |
| 20kN    | 1,3                 |
| 30kN    | 1,4                 |
| 40kN    | 1,5                 |
| 50kN    | 1,6                 |

## 5.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM MODELO NUMÉRICO

O processo de modelação foi apresentado no ponto 4.8.

O Quadro 5.9 resume as extensões de compressão médias obtidas na rede de extensómetros ópticos da *FiberSensing*, para uma força de 50kN, e o valor previsto pelo modelo de elementos finitos gerado. Nesta incluem-se também os desvios relativos em percentagem entre os sensores ópticos e o modelo.

Relativamente ao ensaio 7 apresenta-se o Quadro 5.10, o qual contém a mesma informação. Comparativamente, os desvios relativos são menores quando os extensómetros de fibra óptica são traccionados e, adicionalmente, verifica-se dos dois tipos de sensores o *standard polyimide strain sensor* aproxima-se mais do comportamento previsto no modelo. No que concerne ao ensaio por patamares constata-se que a ordem de grandeza dos desvios relativos entre sensores ópticos e modelo

é a mesma do Ensaio Estático 6, onde o sensor EFO2 apresenta extensões aproximadamente 9% superiores e o sensor EFO3 entre os 10 e os 11%. Conclui-se também que a resposta dos sensores ópticos está mais afastada do modelo numérico do que a resposta dos sensores eléctricos, comparação realizada no Capítulo 4.

Quadro 5.9 – Resultados de extensões do modelo e Ensaio 6 com desvios relativos ( $\Delta$ ).

| F [kN] | $\epsilon_{ANSYS}$ [‰] | Secção S1             |                     |                       |                     |
|--------|------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
|        |                        | $\epsilon_{EFO2}$ [‰] | $\Delta_{EFO2}$ [%] | $\epsilon_{EFO3}$ [‰] | $\Delta_{EFO3}$ [%] |
| 50     | 0,755                  | 0,828                 | 9,6                 | 0,836                 | 10,7                |

Quadro 5.10 – Resultados de extensões do modelo e Ensaio 7 com desvios relativos ( $\Delta$ ).

| F [kN] | $\epsilon_{ANSYS}$ [‰] | Secção S1             |                     |                       |                     |
|--------|------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
|        |                        | $\epsilon_{EFO2}$ [‰] | $\Delta_{EFO2}$ [%] | $\epsilon_{EFO3}$ [‰] | $\Delta_{EFO3}$ [%] |
| 50     | 0,779                  | 0,824                 | 5,8                 | 0,838                 | 7,6                 |

Quadro 5.11 – Resultados de extensões do modelo e Ensaio 8 com desvios relativos ( $\Delta$ ).

| F [kN] | $\epsilon_{ANSYS}$ [‰] | Secção S1             |                     |                       |                     |
|--------|------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
|        |                        | $\epsilon_{EFO2}$ [‰] | $\Delta_{EFO2}$ [%] | $\epsilon_{EFO3}$ [‰] | $\Delta_{EFO3}$ [%] |
| 10     | 0,151                  | 0,164                 | 8,3                 | 0,165                 | 9,1                 |
| 20     | 0,302                  | 0,328                 | 8,7                 | 0,332                 | 10,1                |
| 30     | 0,453                  | 0,493                 | 8,9                 | 0,500                 | 10,4                |
| 40     | 0,604                  | 0,660                 | 9,3                 | 0,670                 | 10,9                |
| 50     | 0,755                  | 0,824                 | 9,1                 | 0,839                 | 11,0                |

## 5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que concerne à comparação de extensómetros ópticos entre si concluiu-se que extensómetros do tipo do EFO1 não são actualmente uma solução viável para os trabalhos de monitorização a levar a cabo pela equipa do LABEST. Para que tal se verifique é necessário realizar mais testes de modo a ganhar mais confiança nos resultados destes, uma vez que os obtidos nestes ensaios não foram satisfatórios. Considera-se importante testar a técnica de colagem proposta pela empresa fabricante dos mesmos, de modo a que em futuros trabalhos realizados com o intuito de avaliar a fiabilidade destes sensores não sejam cometidos os mesmos erros e explorar a questão da sensibilidade dos mesmos.

Quando comparados com os sensores eléctricos os sensores de fibra óptica, mais propriamente os sensores de *Bragg*, apresentam inúmeras vantagens. Foi referido que estes últimos são insensíveis à interferência provocada por campos electromagnéticos e daí não se colocar a questão de ruído branco, principal desvantagem das redes de sensores eléctricos, principalmente em ambientes não controlados.

De facto, os sensores de fibra óptica utilizados nestes ensaios são baseados na modulação do comprimento de onda, o que significa que é o comprimento de onda da luz reflectida a característica alvo de variações, variações essas posteriormente correlacionadas com a deformação provocada à

estrutura. Sendo o comprimento de onda uma propriedade da luz independente das perdas que possam existir ao longo da fibra, a resposta linear destes à extensão foi bastante satisfatória.

No primeiro ensaio estático, em que se submeteram os sensores de fibra óptica a esforços de compressão a sua resposta foi positiva, nomeadamente dos sensores da marca *FiberSensing*. Estes apresentaram um desvio inferior a 5% quando comparados com o extensómetro de resistência eléctrica e, do ponto de vista do autor, num demonstrador laboratorial com um sistema de carregamento diferente e mais automatizado poderiam ter sido atingidos valores ainda inferiores, dada a elevada sensibilidade que os sensores ópticos apresentam face a um carregamento que, por mais controlo e precisão que se tentasse inculir, esteve sempre aquém do que se considera ser um ciclo de carga/descarga ideal.

Relativamente à análise comparativa dos sensores ópticos e eléctrico quando traccionados, em ambos os procedimentos obtiveram-se desvios uma vez mais na ordem dos 5%. De referir que o Ensaio Estático 8 foi conduzido de forma a avaliar o erro para valores de carga mais baixos, os quais não poderiam ser avaliados de outra forma senão por patamares, dado nos ensaios cíclicos os desvios iniciais serem bastante superiores por motivos alheios ao sistema de monitorização. Neste verificou-se que para valores de carga de 10kN e 20kN o desvio é de aproximadamente 2%, no entanto, à medida que o nível de força actuante aumenta o desvio é também superior, atingindo-se o valor já referido de 5% para 50kN.

Por fim pode ser mencionado o facto de os extensómetros de fibra óptica apresentarem dimensões mais reduzidas do que os extensómetros eléctricos e a perda de sinal poder ser controlada com o aumento de potência da fonte, contudo esta última questão não foi avaliada no presente trabalho.

# 6

## MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UM VIADUTO DO METRO DO PORTO

### 6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A observação e o estudo do comportamento estrutural assumem particular importância em obras de maior dimensão, com sistemas estruturais complexos, e nas situações em que da ocorrência de danos, resultam prejuízos severos. Como consequência, actualmente as entidades responsáveis pela exploração deste tipo de obras dão especial ênfase à instalação de sistemas de monitorização, na medida em que estes fornecem dados essenciais aos modelos de decisão que permitem calendarizar e tipificar intervenções nas estruturas existentes, de reparação ou reabilitação, caso estas apresentem sinais evidentes de deterioração e diminuição de desempenho do ponto de vista estrutural.

De acordo com esta lógica de gestão a empresa Metro do Porto S.A. assumiu o compromisso de monitorizar algumas das suas principais infra-estruturas, sendo uma destas o viaduto misto do Parque da Maia. Este viaduto insere-se no conjunto de obras cujo desempenho importa acompanhar, dadas as dimensões, particularidades e importância desta estrutura. A referida estrutura, que permite o cruzamento desnivelado com uma via periférica e a Estrada Nacional 14, insere-se na linha C da rede do Metro do Porto, Fig. 6.1.

É, assim, objectivo da presente dissertação abordar este caso de estudo de modo a introduzir o tema da monitorização e instrumentação de obras numa escala real, onde as adversidades e os problemas levantados diferem substancialmente dos apresentados aquando da aplicação de sistemas de monitorização em laboratório.

No enquadramento referido, para além das presentes considerações iniciais neste documento incluem-se mais quatro subcapítulos. O primeiro destes (6.2) apresenta uma descrição sumária dos elementos estruturais que materializam o viaduto; no subcapítulo 6.3 procede-se à caracterização do sistema de monitorização, detalhando os vários componentes que o constituem, nomeadamente o sistema de aquisição e a rede de sensores. A definição do procedimento do ensaio consta do subcapítulo 6.4, enquanto a análise dos resultados obtidos neste se insere no âmbito do subcapítulo 6.5. Em 6.6 apresentam-se as considerações finais.

De salientar que neste trabalho não se procedeu à modelação da estrutura para confrontação dos resultados obtidos no sistema de monitorização, uma vez que tal saía do âmbito dos objectivos deste capítulo. Assim, optou-se por comparar os valores registados com os obtidos em campanhas de monitorização anteriores e com um modelo numérico da estrutura gerado pelo LABEST aquando dos primeiros estudos desta obra.



Fig. 6.1 – Localização da estação Parque da Maia na Rede da Metro do Porto.

## 6.2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

O viaduto misto do Parque da Maia permite o atravessamento desnivelado sobre uma via periférica e a EN14, possuindo a particularidade de a estação do Parque da Maia se localizar sobre o próprio viaduto.

O viaduto apresenta uma altura constante de 2,25m e um comprimento total de 497,20m ao longo de 15 tramos, sendo que os atravessamentos sobre a via periférica e a EN14 são realizados com tramos de 40,50m e de 48,80m de vão, respectivamente. Relativamente ao tramo corrente do viaduto este vence um vão de 30,60m, contudo os tramos extremos dos encontros Este e Oeste possuem vãos de 24,80m e 36,60m, respectivamente. Realça-se a particularidade de nos últimos três tramos do lado Este do viaduto se localizar a estação do Parque da Maia, conforme referido anteriormente.

O traçado em planta e a sua rasante possuem algumas sinuosidades relevantes, como se ilustra na Fig. 6.2.

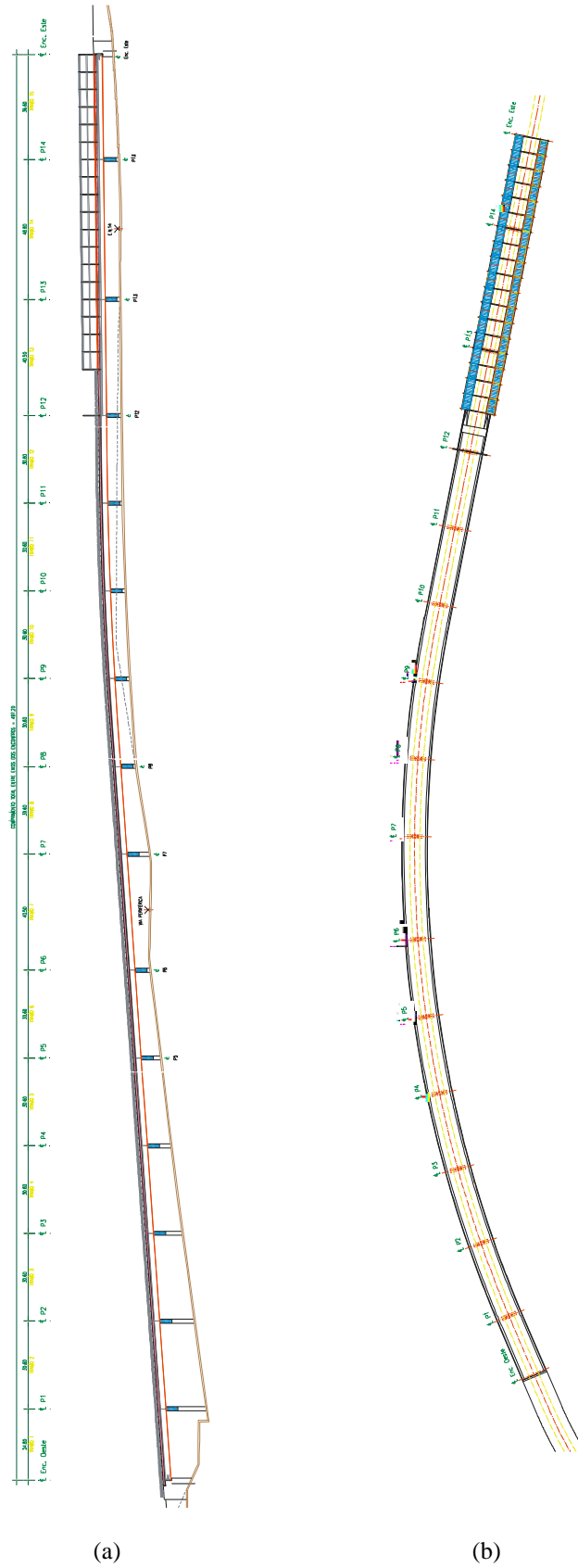


Fig. 6.2 - Traçado do viaduto do Parque da Maia: a) rasante; b) em planta.

### 6.2.1. TABULEIRO DO VIADUTO

O tabuleiro do viaduto do Parque da Maia é materializado por uma viga mista de aço e betão contínua, apoiada em 14 pilares de betão armado e em dois encontros por intermédio de aparelhos de apoio do tipo neoprene. A referida viga mista é constituída por duas vigas metálicas em aço S355, com uma altura de 1,950m entre faces extremas dos banzos, e uma laje de betão armado, cuja espessura varia na direcção transversal entre os 0,200m na extremidade das consolas e 0,300m entre vigas, Fig. 6.3 e Fig. 6.4.

Relativamente à estrutura metálica, pode ainda detalhar-se que as almas destas vigas possuem uma espessura que varia entre os 14mm e os 22mm, com reforços transversais afastados em geral cerca de 3000mm, enquanto os banzos apresentam uma largura de 500mm no caso do banzo superior, aumentando para 700mm na zona dos tramos que suportam a estação, e de 700mm no caso do banzo inferior, sendo a espessura de ambos os banzos variável entre os 30mm e 140mm.

Conforme mencionado, a laje de betão armado do tabuleiro apresenta-se apoiada entre as vigas metálicas, sendo prolongada em duas consolas que perfazem uma largura total de 10,100m. Contudo, na zona da estação de metro, esta largura é incrementada por meio de uma estrutura metálica adicional, de modo a integrar os passeios e acessos nas zonas dos cais, perfazendo assim uma largura total de 13,750m.

Refere-se ainda sumariamente o sistema de contraventamento do tabuleiro do viaduto. Este é materializado em perfis tubulares, igualmente em aço S355, e é constituído por um sistema de diafragmas transversais e por um sistema de contraventamento horizontal, Fig. 6.3.

Na zona da estação existe um sistema de pórticos transversais, que suporta a cobertura do cais, sendo aqueles realizados com perfis tipo HEA e ligados à laje do tabuleiro por meio de conectores metálicos. Na Fig. 6.4 ilustra-se a secção transversal do viaduto na zona da estação, podendo-se observar a instalação dos referidos pórticos.

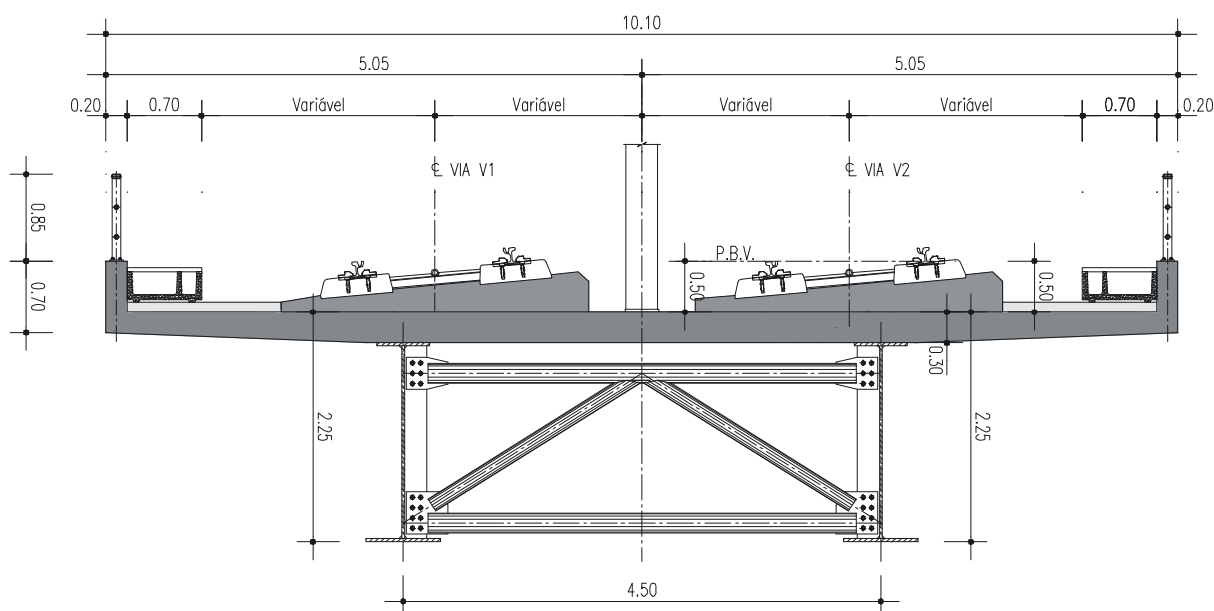


Fig. 6.3 – Secção transversal do viaduto no vão, em zona corrente (Sousa et al., 2006).

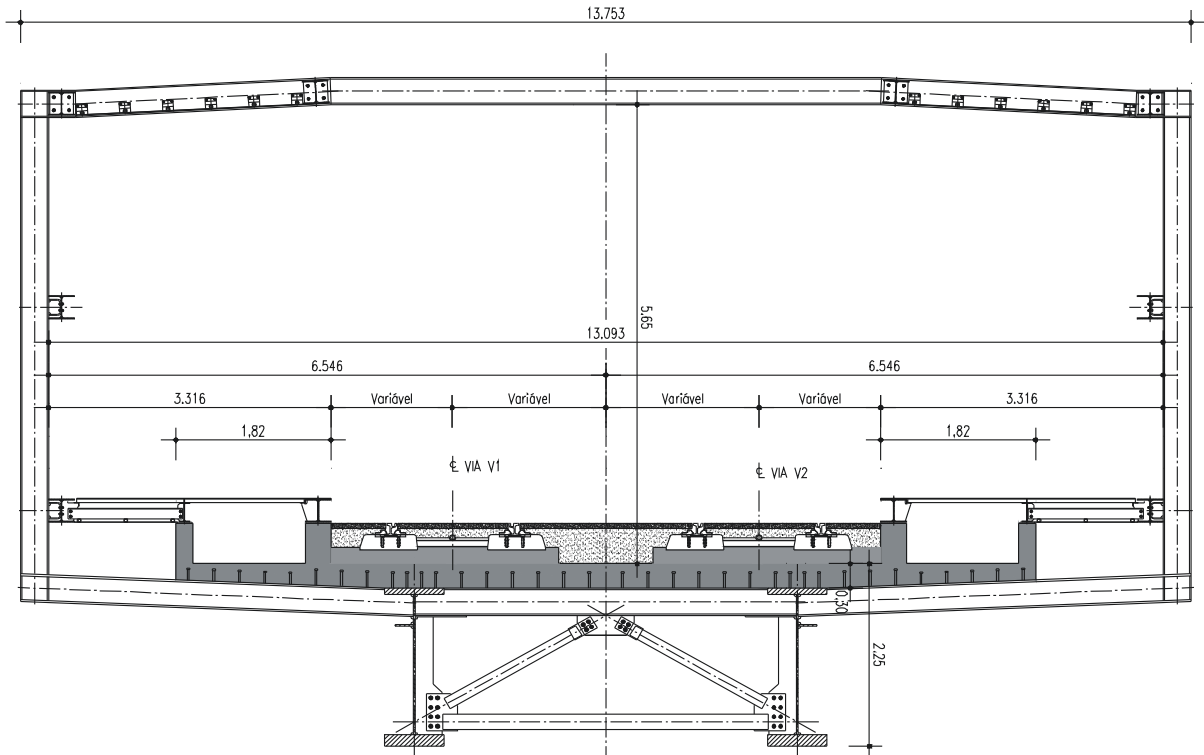


Fig. 6.4 – Secção transversal do viaduto no vão na estação (Sousa et al., 2006).

### 6.2.2. PILARES DO VIADUTO

Os pilares possuem uma configuração transversal em Y, conciliando-se deste modo a solução de um fuste único em betão armado, cuja secção é constante e apresenta como dimensões 2,7 por 1,4m, Fig. 6.5. Para garantir a necessária resistência à flexão entre os braços superiores do pilar, existe um tirante metálico, constituído por dois perfis HEA 400 em aço S355, devidamente ancorado no interior da massa de betão.

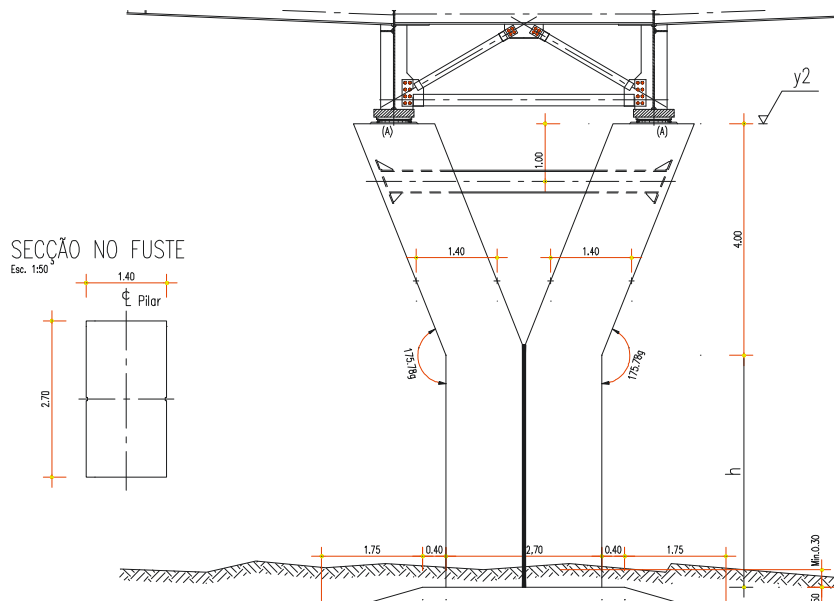


Fig. 6.5 – Pilares do viaduto (Sousa et al., 2006).

### 6.2.3. FUNDAÇÕES E ENCONTROS DO VIADUTO

Os encontros são realizados em betão armado aparente, conforme se mostra na Fig. 6.6, tendo os muros de suporte uma altura, em média, de aproximadamente 8,5m e 11,0m nos encontros Este e Oeste, respectivamente. Mais detalhes sobre a execução dos encontros são ilustrados na Fig. 6.6.

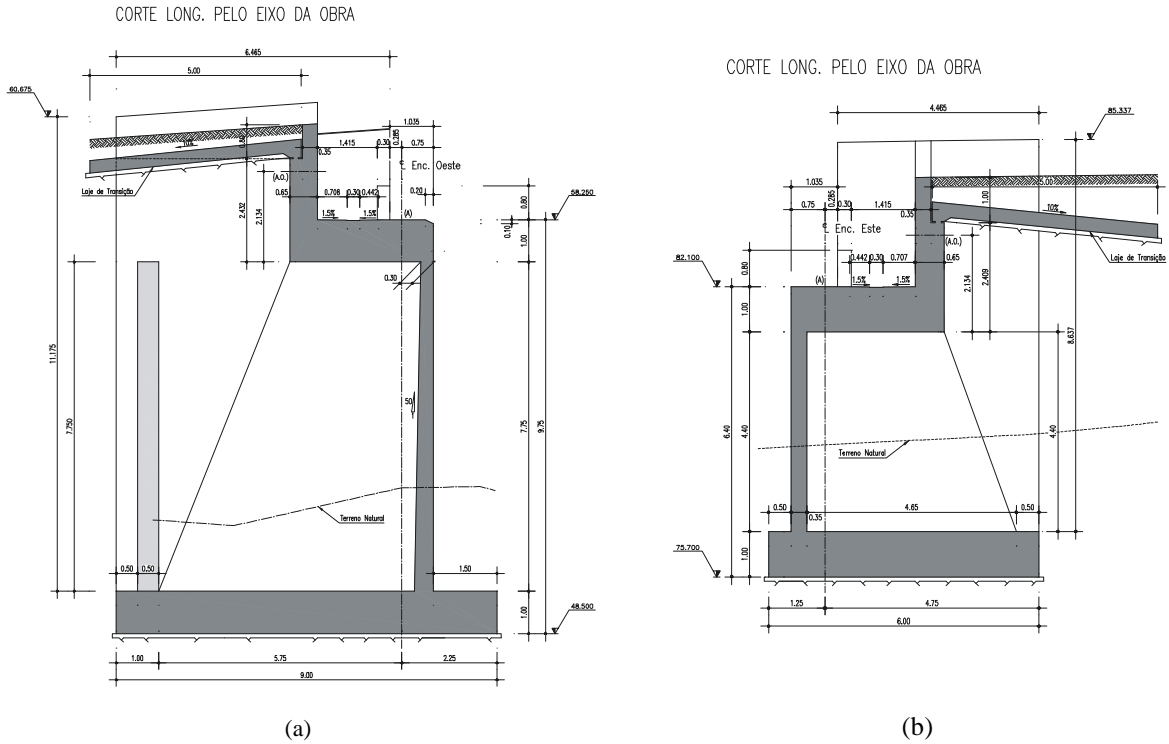


Fig. 6.6 – Encontros do viaduto: a) Encontro Oeste; b) Encontro Este (Sousa et al., 2006).

No que concerne às fundações da estrutura, a solução inclui fundações directas materializadas por sapatas em alguns pilares, e por fundações indirectas, através de maciços de encabeçamento com quatro estacas de 1,0m de diâmetro. Contudo, nos pilares P13 e P14 da zona da estação, os maciços são de maior dimensão, possuindo seis estacas de 1,0m de diâmetro. É esta solução que se apresenta na Fig. 6.7b).

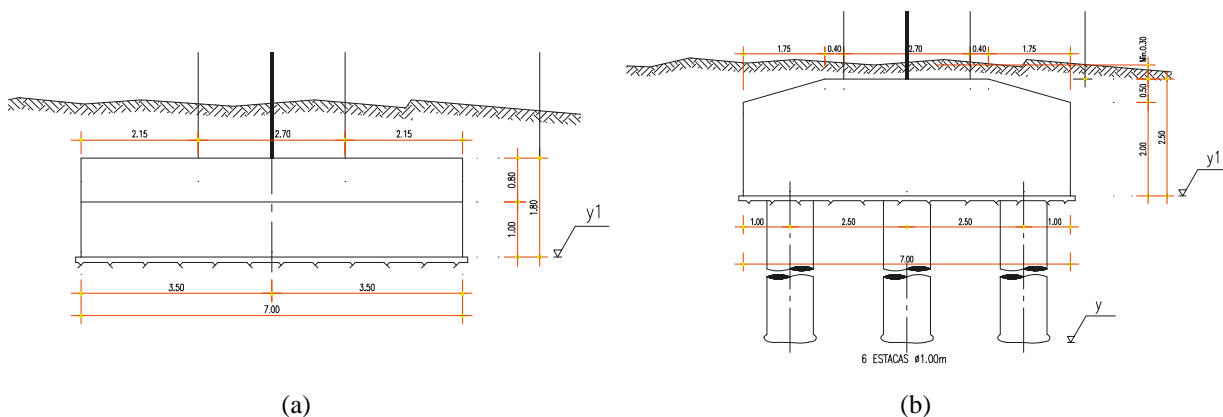


Fig. 6.7 – Fundações do viaduto: a) directas; b) indirectas (Sousa et al., 2006).

### 6.3. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

#### 6.3.1. REDE DE SENSORES

A rede de sensores utilizada foi seleccionada tendo em conta o tipo de grandeza que se pretendia medir. Assim, aquela foi fundamentalmente constituída por dois tipos de sensores: os extensómetros de resistência eléctrica de colar e os de embeber no betão. Os extensómetros escolhidos para integrarem a rede de instrumentação dos ensaios que serão apresentados fazem parte de uma rede de acompanhamento contínuo do comportamento estrutural, i.e., de um sistema de monitorização permanente. Este sistema foi instalado durante a fase construtiva do viaduto.

Atendendo ao facto de os vãos nos atravessamentos desnivelados sobre a via periférica e a EN14 serem maiores, foram eleitas duas zonas de instrumentação, sendo estas simplificadaamente designadas como Zona A e Zona B. A Zona A diz respeito aos tramos 7 e 8 situados na zona da via periférica, enquanto a Zona B inclui os tramos 14 e 15 situados sobre a EN14, ou seja, a estação de metro do Parque da Maia. Relativamente às características do traçado, a zona A é uma zona de curva em planta com uma rasante de aproximadamente 7%, enquanto a zona B é uma zona recta em planta com uma inclinação da rasante de aproximadamente 1,2%. Deve ainda ser referido que na Zona B se localiza o maior vão, correspondente ao tramo 14 com um comprimento de 48,80m; na Zona A localiza-se o segundo maior vão, com 40,50m no tramo 7.

Refere-se de seguida a rede de sensores instalada nas secções instrumentadas em cada uma das Zonas A e B e, indicando-se na Fig. 6.8 a nomenclatura dos alinhamentos utilizados para identificação dos sensores. A título de exemplo, o sensor EC-S3-1C é um Extensómetro de Colar, localizado na Secção S3 na intercepção dos alinhamentos 1 e C, enquanto o EB-S6-3E é um Extensómetro de Embeber no betão, localizado na Secção S6, na intercepção dos alinhamentos 3 e E.

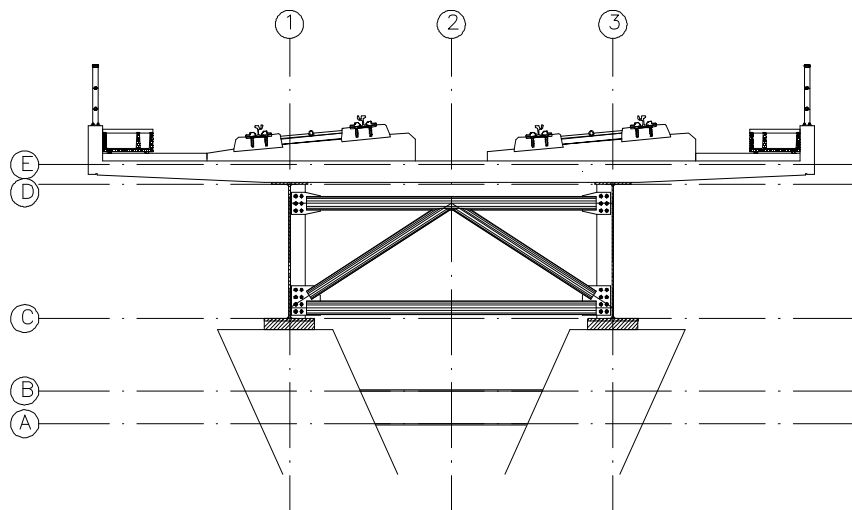


Fig. 6.8 – Alinhamentos para designação dos sensores.

#### *Zona A*

De acordo com o que se ilustra na Fig. 6.9, na zona da estrutura junto à via periférica, Zona A, foram instrumentadas quatro secções, S1 a S4, Fig. 6.11. Na Secção S1 foram instalados extensómetros nos banzos superior e inferior da viga sob o carril cujo sentido é Norte-Sul, ou seja, Maia-Porto. Na secção a meio vão do tramo sobre a via periférica, Secção S2, foram colocados extensómetros de embeber no betão fixos às armaduras da laje do tabuleiro, para além dos extensómetros de colar.

Refere-se também que na Secção S3, além da instrumentação da viga metálica do sentido N-S, foram instalados extensómetros nos banzos superior e inferior do tirante existente no topo do pilar P7. É nesta secção também que se efectua a aquisição e interrogação dos sinais de todos os sensores instalados na Zona A, bem como a transmissão remota, com recurso a um Posto de Observação (PO1) instalado na zona interior junto à alma de uma das vigas metálicas.

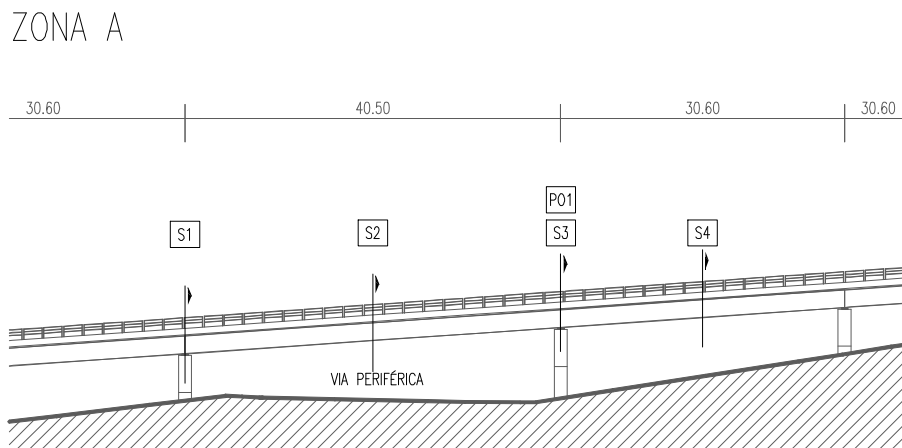


Fig. 6.9 – Secções instrumentadas na Zona A.

### Zona B

Relativamente à zona do viaduto junto à EN14, e de acordo com o que se ilustra na Fig. 6.10, foram instrumentadas quatro secções, S5 a S8 (ver Fig. 6.11). Nestas foram instalados extensómetros nos banzos superior e inferior das vigas metálicas.

Na Secção S6, a meio vão sobre a EN14, e na S7, na zona do pilar P14, foram também colocados extensómetros de embeber no betão fixos às armaduras da laje do tabuleiro. Refere-se também que das quatro secções instrumentadas, a Secção S7, além da instrumentação do vão, foram instalados extensómetros nos banzos superior e inferior do tirante existente no topo do pilar P14, à semelhança do que foi feito na Secção S3. No que concerne à aquisição e interrogação dos sinais de todos os sensores instalados na Zona B, bem como a transmissão remota destes, incluiu-se um Posto de Observação (PO2) na zona interior junto à alma de uma das vigas metálicas da Secção S3.

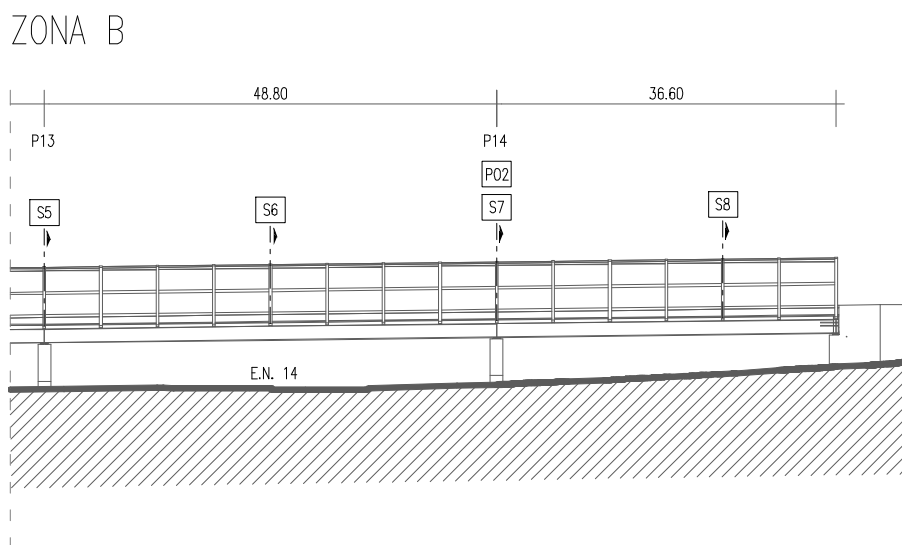


Fig. 6.10 – Secções instrumentadas na Zona B.

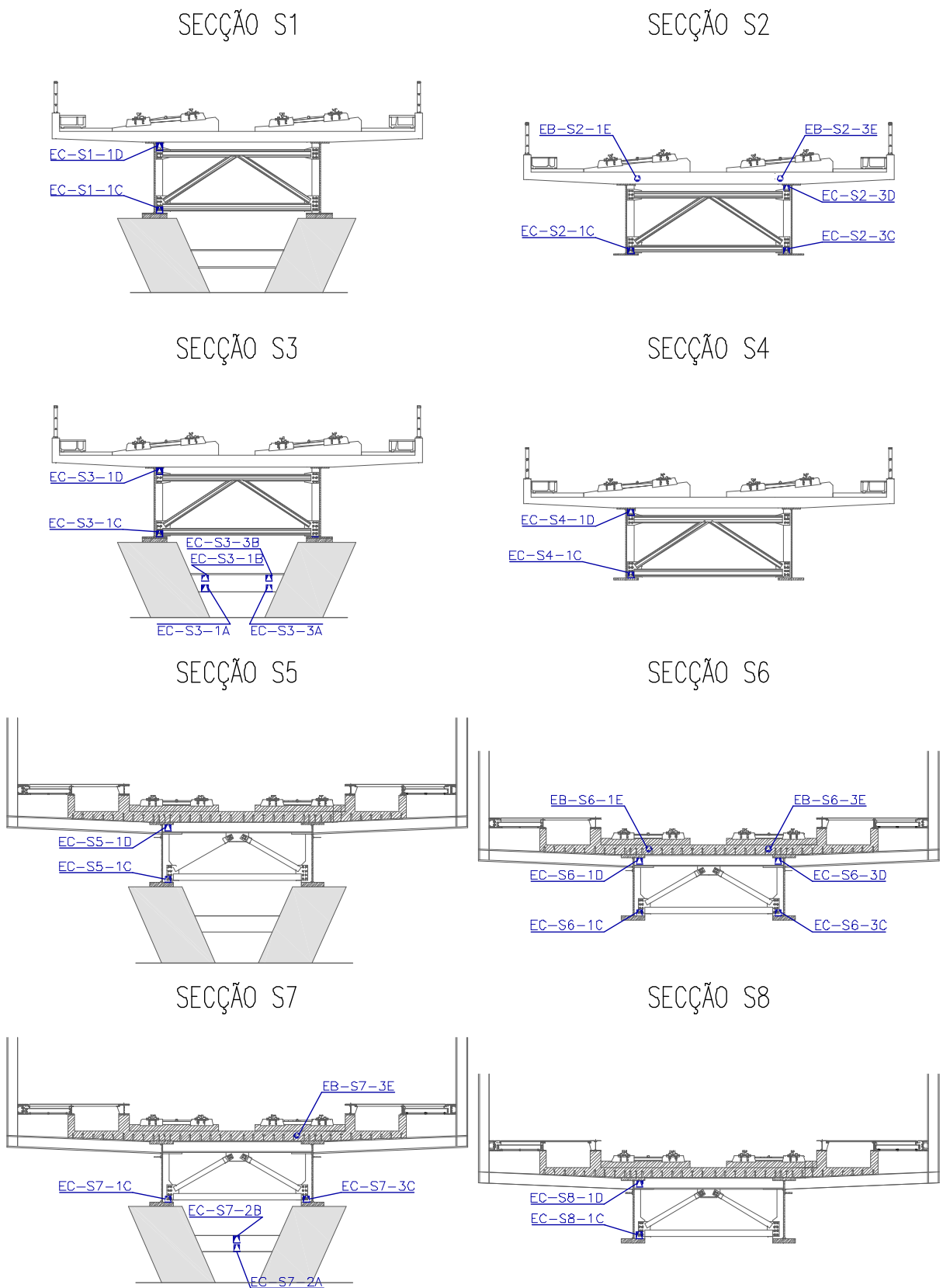


Fig. 6.11 – Localização de sensores ao longo das secções instrumentadas.

### 6.3.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO

O sistema de aquisição utilizado foi o equipamento da linha SCXI, fabricado pela *National Instruments*. Os instrumentos NI SCXI permitem a construção de sistemas para o condicionamento e aquisição de sinal a partir de integração modular, ou seja, o sistema tem a possibilidade de armazenar, alimentar e controlar diferentes módulos incorporados. Esta característica, bem como o facto de ser um sistema de aquisição expansível a vários chassis, tornam este sistema de aquisição versátil uma vez que podem ser ligados vários canais em simultâneo para aquisição de diferentes grandezas. Na Fig. 6.12 apresenta-se um sistema de aquisição deste tipo constituído por dois chassis com a totalidade dos módulos incorporados.



Fig. 6.12 – Sistema de aquisição NI SCXI (Figueiredo, 2006).

O facto de se ter optado por este sistema de aquisição para interrogar a rede de sensores instalada na estrutura deve-se a este permitir obter leituras com frequências mais elevadas, nomeadamente 100Hz. Este requisito está relacionado com a necessidade de se obterem leituras durante a passagem do metro na Zona A do viaduto, uma vez que, ao contrário da zona da estação, este circula a velocidades da ordem dos 50km/h.

### 6.3.3. INSTALAÇÃO DA REDE DE SENSORES EM OBRA

Os sensores de embeber no betão foram instalados aquando das betonagens do tabuleiro nas Secções S2, S6 e S7.

Pese embora o facto de não fazerem parte da rede de sensores que vai ser estudada neste capítulo, instalaram-se também sensores de temperatura nas Secções S2 e S6, conforme ilustrado na Fig. 6.13, dada a importância de controlar a acção da temperatura nas fases iniciais do processo construtivo, bem como em campanhas de monitorização permanente ao longo da vida útil da obra. Na Fig. 6.13 mostra-se a colocação em obra dos sensores através da respectiva fixação à armadura, bem como a protecção das extremidades dos cabos eléctricos para posterior ligação ao sistema de aquisição.

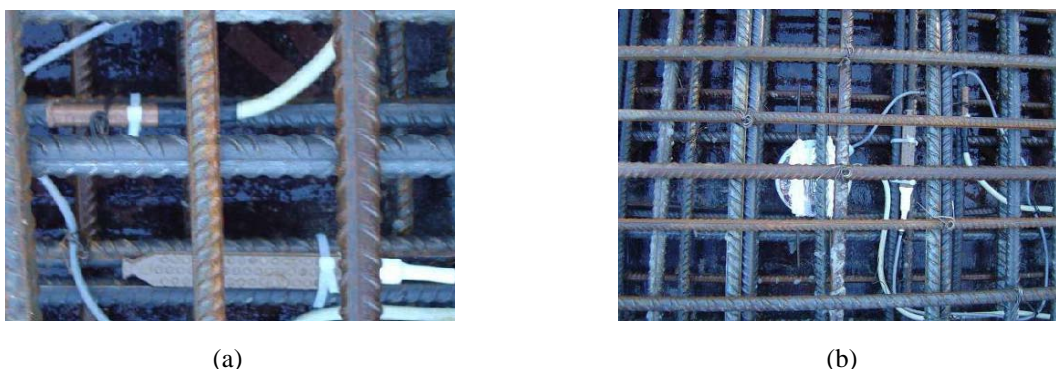


Fig. 6.13 – Colocação: a) Extensómetro e PT100; b) Caixa para os cabos (Sousa et al., 2006).

Além da colocação de sensores de embeber no betão, foram utilizados extensómetros eléctricos de colar em todas as secções referidas. Estes localizam-se nos banzos superior e/ou inferior das vigas metálicas, ilustrando-se na Fig. 6.14 a sua colocação na estrutura.

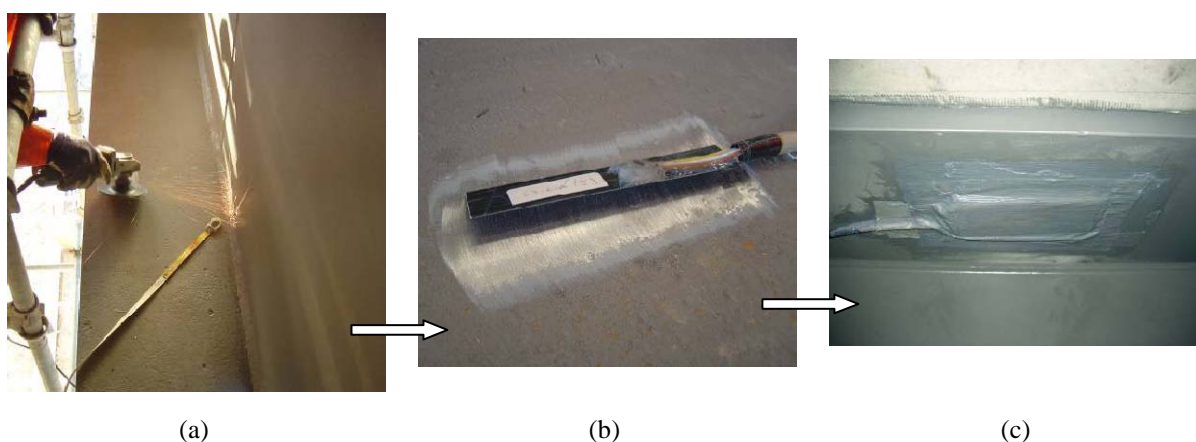


Fig. 6.14 – a) Preparação da superfície; b) posicionamento; c) colagem (Sousa et al., 2006).

A instalação deste tipo de extensómetros inicia-se com uma correcta preparação da superfície através de trabalhos de polimento com recurso a rebarbadora eléctrica equipada com discos de lixa granulados. A área de intervenção é ligeiramente superior à ocupada pelo sensor, e essa mesma área deve ser limpa de vestígios de humidade e gordura com gazes embebidas, numa primeira fase, numa solução de limpeza ácida e posteriormente numa solução de limpeza alcalina (Faria, 2008). Posteriormente, é aplicada à superfície metálica uma película fina de resina *epoxy* para uma adequada colagem do sensor, ao qual é aplicada uma pressão uniforme de modo a eliminar a cola em excesso na interface polímero/aço. Assegura-se assim uma fina camada de elemento adesivo. A importância desta operação reside no facto da transmissão das deformações da estrutura para o material compósito do extensómetro ser regida pela distorção da cola, provocada pelas forças de corte que se geram na interface.

Para assegurar uma adequada longevidade da rede de sensores, cuidados especiais têm que ser adoptados na instalação destes, sobretudo se os mesmos estiverem expostos a condições ambientais severas. Após a aplicação do transdutor, um rectângulo de cortiça, coberto por uma folha de *polyester*, é centrado com o extensómetro e colado à estrutura usando a mesma metodologia empregue na fixação dos sensores. Posteriormente, a folha de *polyester* é impregnada com resina epóxida de protecção com a ajuda de uma trincha, colando simultaneamente as fibras à superfície metálica e selando de imediato a entrada de humidade para o extensómetro.

Finalmente, quando a resina se encontra completamente curada, toda a superfície é pintada com tinta *epoxy*, empregue na pintura e protecção do aço. Este tipo de protecção, aplicada a extensómetros instalados em superfícies metálicas, proporciona protecção mecânica, através da camada de cortiça, e, simultaneamente, evita a insolação directa da área envolvente ao sensor. A resina de protecção e a tinta possibilitam a resistência contra um conjunto variado de factores ambientais, tais como a insolação, radiações ultra-violeta, água da chuva e humidade. Consequentemente, a durabilidade é assegurada e o nível de perturbação introduzido nas leituras é mínimo, uma vez que os materiais empregues possuem baixa rigidez quando comparada com a do aço. Por outro lado, o aspecto geral da instalação resultante é muito discreto, Fig. 6.14c).

A condução de cabos eléctricos foi toda ela realizada ao longo dos banzos das vigas metálicas, estando estes protegidos através de mangas plásticas flexíveis. No caso dos sensores de embeber no betão, após as betonagens foi necessário proceder à ligação dos cabos eléctricos que permitiam a ligação dos sensores ao posto de observação. Assim, foi necessário abrir as caixas previamente embutidas no betão, preparar as extremidades dos cabos daí provenientes e prolongar estes até às designadas caixas de junção, instaladas na estrutura com a função de permitir a ligação ao posto de observação. A Fig. 6.15 ilustra este último processo.

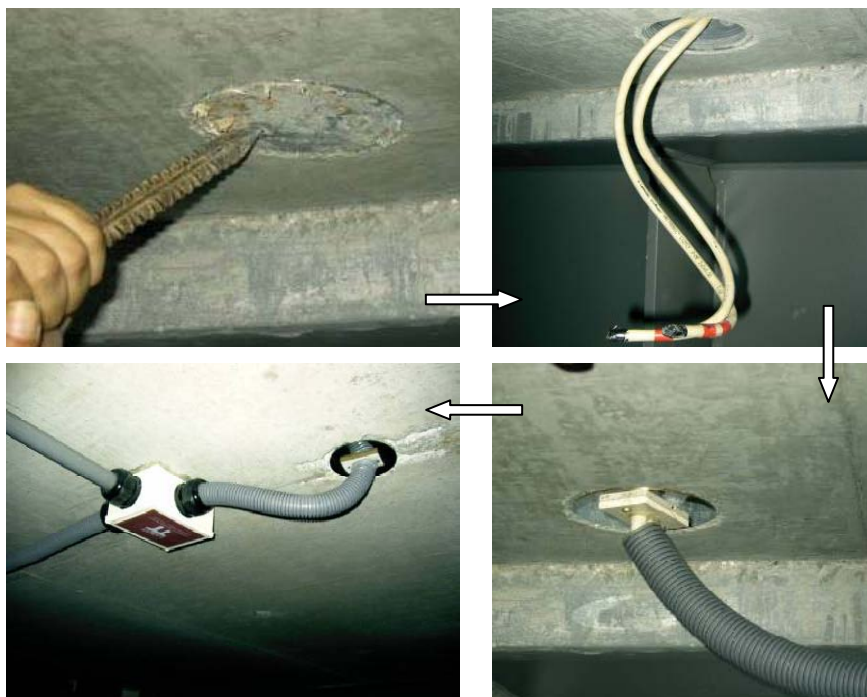


Fig. 6.15 – Ligação dos extensómetros de embeber ao sistema de aquisição (Sousa et al., 2006).

#### 6.4. PROCEDIMENTO DO ENSAIO

O objectivo principal de se apresentar nesta dissertação resultados de uma campanha de monitorização de um viaduto da rede ferroviária da Metro do Porto é o de tomar contacto com esta temática numa escala diferente da apresentada nos capítulos anteriores. De facto, em laboratório a condução de ensaios é realizada num ambiente bastante mais controlado, quando comparado com a instrumentação em obras de engenharia civil, como o caso de estudo aqui apresentado. Assim, neste ensaio procurar-se-á avaliar resultados provenientes de um sistema de monitorização cuja rede de sensores é essencialmente constituída por extensómetros. Aferir-se-á sobre a qualidade das leituras, interpretando os valores obtidos, comparar-se-ão extensómetros de colar com extensómetros de embeber no betão, referindo as vantagens e inconvenientes de cada uma destas soluções, e avaliar-se-á o estado dos extensómetros, visto estes já terem sido aplicados na estrutura aquando da execução da mesma.

Os ensaios que se pretendem analisar correspondem às passagens do metro em ambos os sentidos a 4 de Março de 2010 por volta das 11h15 da manhã na estação do Parque da Maia e cerca das 12h00 sobre a via periférica da Zona A. O primeiro ensaio (Ensaio 1) corresponde às passagens observadas na Zona B e coincidiu com a circulação do metro com uma composição: a primeira passagem deu-se no sentido Norte-Sul (N-S), isto é, proveniente da Maia com destino ao Porto, e a segunda no sentido Sul-Norte (S-N). O intervalo de tempo entre estas passagens foi de aproximadamente 4min.

O segundo ensaio (Ensaio 2) diz respeito às passagens de um metro de duas composições observadas na Zona A, tendo a primeira passagem ocorrido no sentido N-S e a segunda no sentido S-N. O tempo de espera entre estas passagens foi de aproximadamente 2min. Neste ensaio a circulação coincidiu com passagens de metros com duas compisções.

De forma a poder avaliar melhor a informação adquirida no sistema de aquisição relativamente à Zona B apresentam-se as Fig. 6.16 e Fig. 6.17, as quais indicam esquematicamente o local de paragem do metro na estação do Parque da Maia nos sentidos N-S e S-N, respectivamente. Combinando a informação destas figuras com a da Fig. 6.8, a qual contém a totalidade dos alinhamentos envolvidos na localização da rede de sensores, conclui-se que as passagens com sentido N-S solicitarão uma resposta mais evidente por parte dos sensores localizados sob o alinhamento 1, enquanto no sentido inverso são os sensores localizados sob o alinhamento 3 os que apresentaram valores mais elevados.

Enquanto no Ensaio 1 se procurará aferir sobre a qualidade das leituras, estado dos extensómetros, explicar a curva de extensão em relação ao tempo consoante a posição do metro desde o instante em que entra na estação até sair desta, e desenhar diagramas de extensão baseados nos valores obtidos aquando da imobilização do metro, no Ensaio 2 apenas se tecerão considerações relativas ao estado dos extensómetros, de modo a perceber se estes se encontram em boas condições para eventuais futuros ensaios de carga.

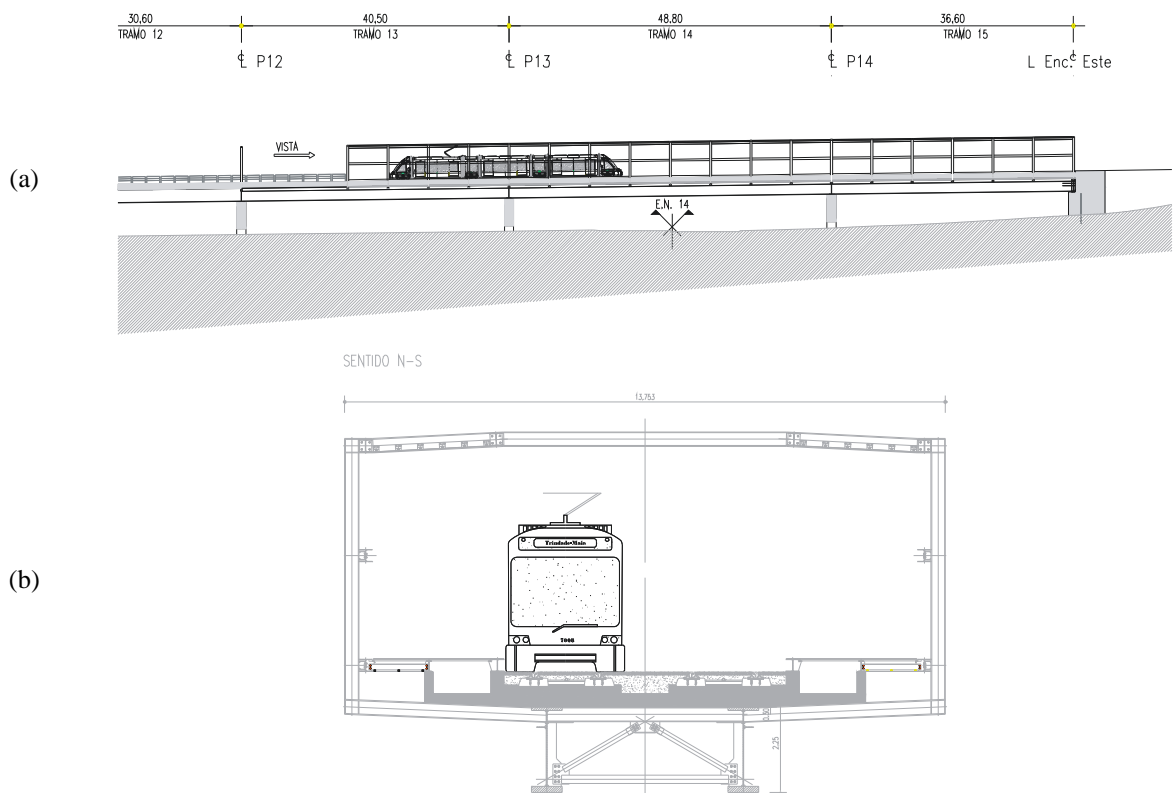


Fig. 6.16 – Paragem no sentido N-S: a) longitudinal; b) transversal (Sousa et al., 2006).



## 6.5. ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS

### 6.5.1. ENSAIO 1 - PASSAGENS NA ZONA B

Os resultados do ensaio serão apresentados por secção instrumentada de modo a facilitar a análise dos dados adquiridos. Isto é, o estudo das passagens na Zona B será apresentado com recurso a gráficos de extensões em função do tempo para os diferentes alinhamentos de cada secção.

Face à elevada frequência de aquisição e ao facto dos ensaios serem conduzidos num ambiente propício à introdução de ruído inclui-se, nesta análise um tratamento estatístico da informação adquirida, procedimento que ainda não tinha sido adoptado no desenvolvimento desta dissertação face à qualidade do sinal recebido nas aplicações anteriores. Este tratamento é semelhante a uma média aritmética, contudo assume a designação de média móvel uma vez que projecta valores, com base no valor médio da variável em causa, ao longo de um número específico de períodos precedentes:

$$F_{t+1} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N A_{t-j+1} \quad (7.1)$$

Na expressão (7.1)  $N$  é o número de períodos anteriores a incluir na média móvel,  $A_i$  é o valor no instante  $i$  e  $F_k$  é o valor previsto no instante  $k$ . Assim, compreende-se que o valor da grandeza a determinar, neste caso a extensão, é baseado no comportamento passado da mesma, o que se traduz numa impossibilidade de antecipação das mudanças do comportamento da variável em causa. Contudo, esta falta de precisão não é de todo relevante para o presente caso de estudo.

De facto, uma vez que o ensaio foi conduzido com uma frequência de 100Hz, isto é, com 100 leituras por segundo, se for definido  $N$  igual a 100, obtêm-se valores de extensão médios por segundo e assim, conseguem-se desenhar gráficos de extensão ao longo do tempo mais claros, onde a introdução de interferências electromagnéticas e electrostáticas não se fazem sentir.

### Secção S5

A rede de sensores instalada na Secção S5 é constituída pelos extensómetros de colar EC-S5-1C e EC-S5-1D, ou seja, dois sensores localizados no alinhamento 1, o qual é mais solicitado aquando da primeira passagem, visto no sentido N-S o metro circular pela via localizada sobre o perfil metálico 1. Por outro lado a Secção S5 está localizada sobre o pilar P13, e dadas as posições de paragem do metro de acordo com as Fig. 6.16 e Fig. 6.17, espera-se que o alinhamento C se encontre submetido a tensões de compressão, enquanto o alinhamento D de tracção, sendo que o eixo neutro da secção intercepta a alma das vigas.

Conforme a Fig. 6.19 ilustra verifica-se o comportamento descrito anteriormente. Desta figura conclui-se que a extensão de compressão do banzo inferior da viga 1 quando o metro se encontra parado na estação do Parque da Maia junto ao lado Oeste da mesma é de aproximadamente 0,016%, enquanto para a paragem relativa ao sentido de circulação contrário aquela é da ordem dos 0,006%. Relativamente à extensão de tracção do banzo inferior da viga fornecida pelos sensores, aquela foi de 0,001%.

Um último aspecto que pode ser observado diz respeito ao comportamento inicial e final do sensor EC-S5-1C para a primeira passagem. De facto, a deformada causada na estrutura devido à circulação do metro ao entrar na estação, momento de paragem e posterior arranque, segue a lei representada na Fig. 6.19. Numa primeira fase, com o metro situado no vão entre o pilar P14 e o encontro Este, o diagrama de momentos na estrutura é tal que as tracções na Secção S5 se localizam na face inferior do

tabuleiro, daí o pico inicial de extensão de tracção de 0,003%. De seguida, com a paragem do metro na estação, o banzo inferior da viga comprime-se conforme já debatido. Por fim, com o arranque o nível de compressão tem forçosamente de aumentar, uma vez que a dada altura o metro deixa de se encontrar sobre o pilar P14, solicitando mais à flexão o vão entre este e o pilar P13. Os momentos negativos sobre este último serão necessariamente superiores.

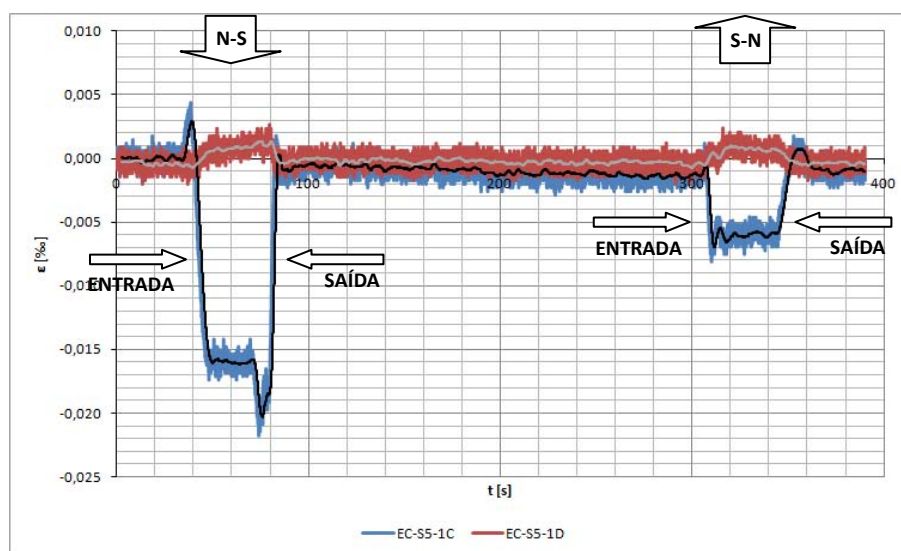


Fig. 6.19 – Extensões lidas com os sensores EC-S5-1C e EC-S5-1D.

### Secção S6

A Secção S6 localiza-se no centro do maior vão do viaduto. Na Fig. 6.20 representam-se as curvas de extensão em relação ao tempo para os banzos inferiores dos dois perfis metálicos do tabuleiro. De acordo com o que foi referido, aquando da primeira passagem no sentido Maia-Porto é a via férrea localizada sobre o alinhamento 1 que é mais solicitada, enquanto na segunda passagem, com destino ao ISMAI, é o alinhamento 3 aquele que exhibe maiores deformações.

Recorrendo à Fig. 6.20 verifica-se que o exposto no parágrafo anterior se verifica, contudo seria de esperar que os valores de extensão fossem iguais no sensor EC-S6-1C aquando da primeira passagem e no EC-S6-3C na segunda. Por sua vez, segundo a mesma lógica, as extensões obtidas com o sensor EC-S6-3C na primeira passagem também deveriam ser as mesmas do sensor EC-S6-1C quando este circulava sentido S-N. De facto, mesmo com um comportamento coerente em todos os extensómetros, os valores apresentados pelo sensor localizado sobre o alinhamento 3 são mais congruentes tendo em consideração extensões obtidas na instrumentação da Secção S2 e estão mais próximos dos valores obtidos em campanhas de monitorização anteriores e do modelo numérico. Segundo Sousa e tal., para a deformação axial do banzo inferior da viga localizada sob o alinhamento 3 aquando da primeira passagem (N-S) o valor de extensão deveria estar balizado entre 0,0206‰ e 0,0218‰. No que concerne à passagem no sentido S-N o mesmo banzo deveria registar extensões compreendidas entre 0,0317‰ e 0,0332‰. Consequentemente, a raiz do problema reside no extensómetro eléctrico EC-S6-1C e, segundo o que foi exposto no segundo capítulo deste trabalho, os factores mais propícios a estar na origem de mau desempenho deste tipo de sensores são a elevada sensibilidade destes à acção térmica e o estado em que se encontra a interface entre este e a estrutura dado a instalação da rede de sensores datar de 2005. Uma vez que o ensaio foi conduzido num curto intervalo de tempo a primeira questão não se coloca, concluindo-se assim que o sensor EC-S6-1C se encontra mal colado ao banzo da viga.

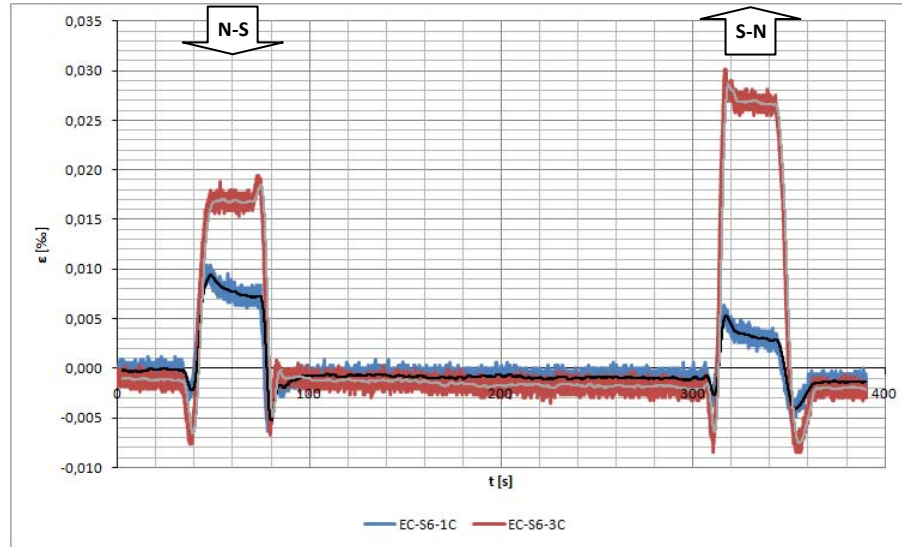


Fig. 6.20 – Extensões lidas com os sensores EC-S6-1C e EC-S6-3C.

Analisando o comportamento de todos os sensores não atendendo ao valor de extensão medida, verifica-se que as correspondentes respostas são satisfatórias. Analisando em detalhe o comportamento do extensómetro EC-S6-3C para a segunda passagem, verifica-se que o banzo inferior da viga é inicialmente comprimido quando o metro entra na estação, traccionado quando este se encontra parado e novamente comprimido quando este arranca. Ora esta variação do estado de deformação é a esperada dada a localização do sensor a meio vão.

Nesta secção foram também instalados extensómetros de embeber no betão, estando as suas respostas ilustradas na Fig. 6.21. Devido ao facto de estarem localizados numa zona superior do tabuleiro, a cerca de 7cm da superfície, aquando da paragem do metro na estação as extensões medidas por estes são reduzidas. Na Fig. 6.21 é possível visualizar uns picos de extensão de compressão na ordem dos 0,0018‰ no sensor EB-S6-3E, o que atendendo à extensão de tracção obtida na face inferior da secção de 0,027‰ em EC-S6-3C e considerando a distância entre os sensores, indica uma posição do eixo neutro a 0,188m da face superior da laje de betão. Deve ser referido que este tipo de sensores é particularmente indicado para medições de extensão na massa de betão em fases iniciais de obra logo após as betonagens, de modo a controlar os fenómenos de retracção do betão. Deste modo é fundamental a presença de sensores de temperatura próximos destes de modo a quantificar o calor de hidratação desenvolvido pela cura do betão, e eliminar as extensões aparentes lidas pelo extensómetro. Segundo Sousa et. al, os valores de extensões de compressão para o sensor EB-S6-1E deveriam ser aproximadamente 0,0015‰, no sentido de circulação N-S, e 0,0016‰ no sentido inverso.

Relativamente ao nível de extensões medido pelos extensómetros colados ao banzo superior dos perfis metálicos, a resposta foi igualmente satisfatória, ver Fig. 6.22. Os sensores apresentam níveis de extensão iguais quando são mais solicitados e o valor medido vai de encontro ao que foi referido anteriormente, visto ser uma extensão de tracção ligeiramente superior à extensão de compressão medida pelos extensómetros de embeber. Quantitativamente, os valores de referência para as deformações axiais de tracção a ser transmitidas por estes sensores estão situados entre os 0,0030‰ e os 0,0026‰, enquanto as extensões de compressão se situam no intervalo de 0,0011‰ e 0,0013‰ (Sousa et al., 2006).

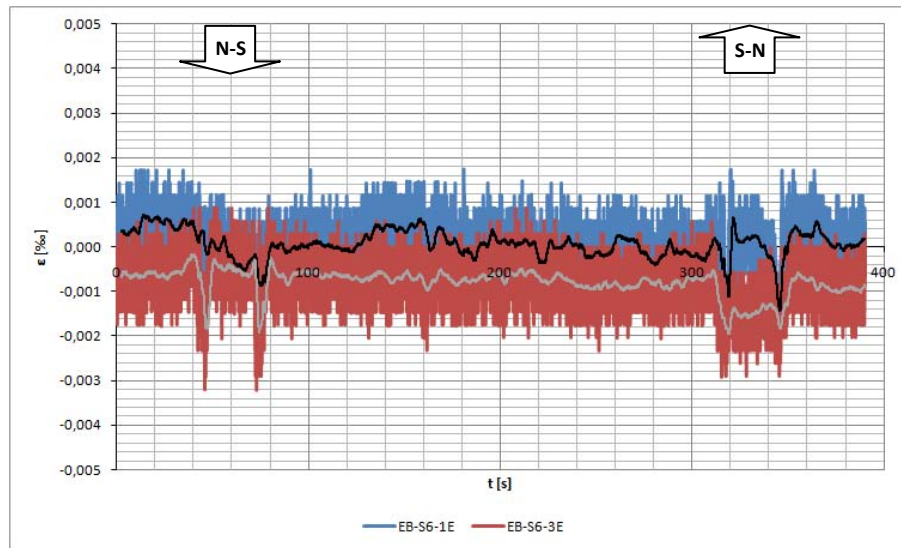


Fig. 6.21 – Extensões lidas com os sensores EB-S6-1E e EB-S6-3E.

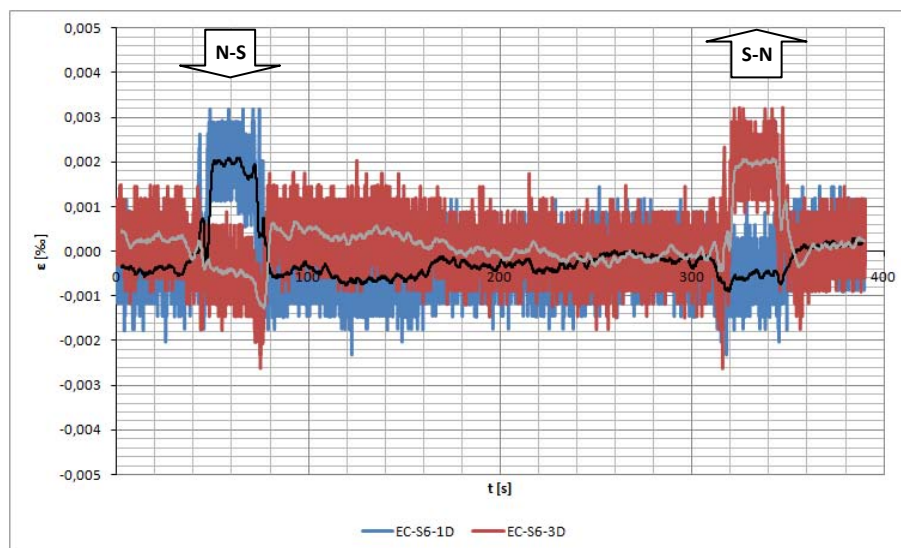


Fig. 6.22 – Extensões lidas com os sensores EC-S6-1D e EC-S6-3D.

Para concluir a análise da Secção S6 apresentam-se as Fig. 6.23a) e Fig. 6.23b), as quais ilustram as extensões obtidas segundo o alinhamento 1 e 3, respectivamente. Foi referido inicialmente que o sensor EC-S6-1C não apresentava valores coerentes, tendo sido por isso escolhido o conjunto de sensores localizados segundo o alinhamento 3 para representar a distribuição de extensões na paragem do metro na estação quando este circulava no sentido S-N e comparar esta com a distribuição proposta na bibliografia, Fig. 6.24. Desta conclui-se que o desvio relativo entre os valores medidos em obra e os de referência é de 12,5% para o extensómetro EB-S6-3E, -28,6% para o extensómetro de colar EC-S6-3D, e, por fim, 16,7% para o extensómetro EC-S6-3C.

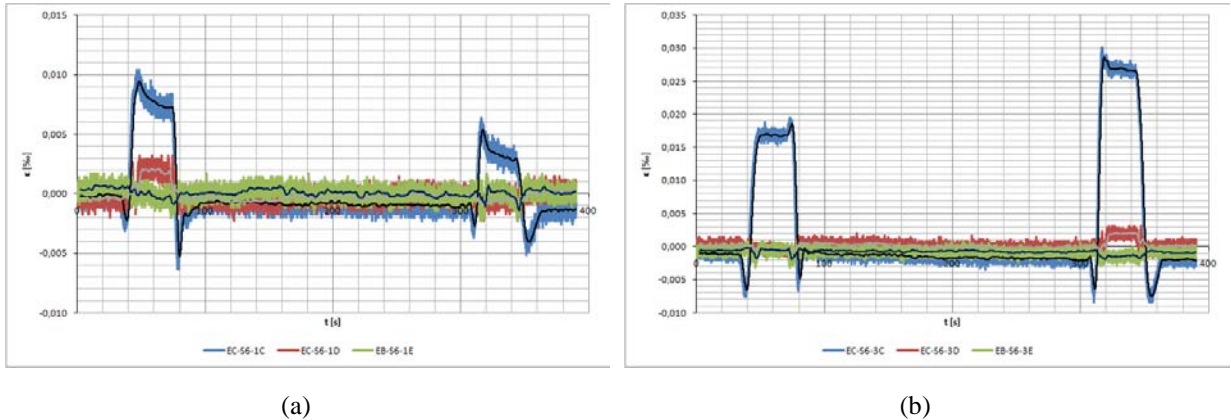


Fig. 6.23 – Resumo de extensões lidas: a) alinhamento 1; b) alinhamento 3.

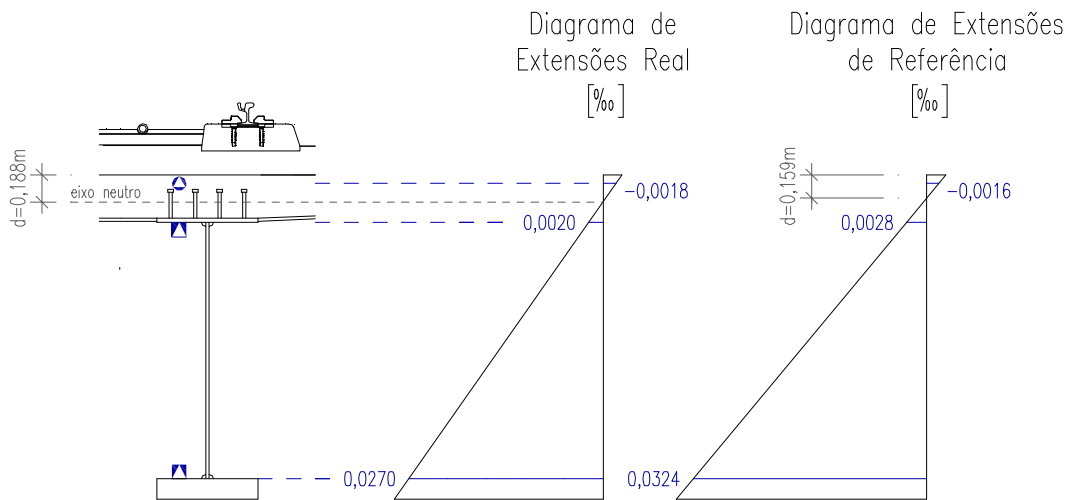


Fig. 6.24 – Diagramas de extensões no alinhamento 3 da Secção S6 para paragem S-N.

### Secção S7

A Secção S7 é a segunda secção da Zona B localizada sobre um pilar, desta vez o pilar P14. A diferença relativamente à Secção S5 é que nesta última apenas dois sensores foram instalados na viga do alinhamento 1, enquanto na Secção S7 se instalaram quatro sensores ao nível dos banzos inferiores das duas vigas, estando colocados dois sensores por banzo, de modo a poderem ser comparadas as respostas da estrutura às passagens em ambos os sentidos e averiguar se a resposta dos sensores colocados no mesmo banzo é igual. Foi ainda interrogado um sensor de embeber no betão e por último dois sensores localizados no perfil metálicos que funciona como tirante entre os braços em Y do pilar.

Em primeiro lugar apresentam-se na Fig. 6.25 as extensões dos sensores localizados no pilar P14. O extensómetro EC-S7-2A encontra-se no banzo superior do perfil HEB, enquanto o extensómetro EC-S7-2B está colado ao banzo inferior. Pelo facto de se encontrarem localizados segundo o alinhamento 2 espera-se que a resposta destes sensores seja igual para ambos os sentidos de circulação. Por outro lado, face à geometria do pilar e à distribuição transversal da carga sobre este, embora o perfil funcione maioritariamente à tracção, este terá forçosamente de compensar uma ligeira flexão dos braços do pilar, a qual introduz momentos negativos nas extremidades deste. Este é o motivo pelo qual as extensões de tracção do alinhamento B são superiores às do alinhamento A.

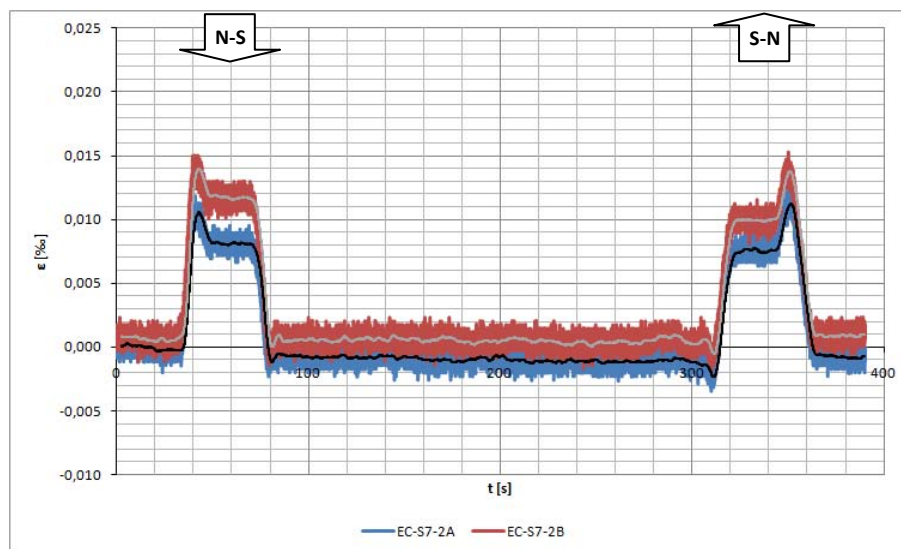


Fig. 6.25 – Extensões lidas com os sensores EC-S7-2A e EC-S7-2B.

Relativamente à verificação da resposta de dois sensores colados no mesmo banzo incluem-se as Fig. 6.26 e Fig. 6.27. Analisando ambas concluiu-se que os quatro sensores se encontram em boas condições de funcionamento, uma vez que a resposta é praticamente coincidente. Contudo, dado os sensores EC-S7-1C(1) e EC-S7-3C(2) apresentarem uma maior amplitude de sinal, indício de maior influência de ruído nas leituras, e extensões diferentes de zero no intervalo de tempo que separa as duas passagens, opta-se por utilizar os extensómetros EC-S7-1C(2) e EC-S7-3C(1) para comparação do comportamento das vigas metálica, Fig. 6.28. Por outro lado, os valores medidos são confirmados pelos previstos por Sousa et al. Segundo este, os valores de extensões de compressão a ser fornecidos nesta secção seriam entre 0,0195‰ e 0,0207‰ para o sensor EC-S7-1C, aquando da passagem com sentido N-S, e entre 0,0070‰ e 0,0076‰ para o sentido de circulação S-N. Relativamente ao sensor EC-S7-3C a extensão de compressão de referência é de aproximadamente 0,0075‰ na primeira passagem e entre 0,0186‰ e 0,0194‰ na segunda.

Relativamente à Fig. 6.28, nesta apresenta-se a evolução da extensão nos banzos inferiores dos perfis metálicos do tabuleiro do viaduto. Com comportamento semelhante ao extensómetro EC-S5-1C, estes dois sensores comportaram-se de forma idêntica para as circulações do metro em ambos os sentidos, sendo que os níveis máximos de extensão de compressão atingidos foram de 0,019‰ no caso de paragem do veículo directamente sobre a viga instrumentada, e no caso de carga em que os alinhamentos do extensómetro e de circulação do metro não coincidem, 0,008‰.

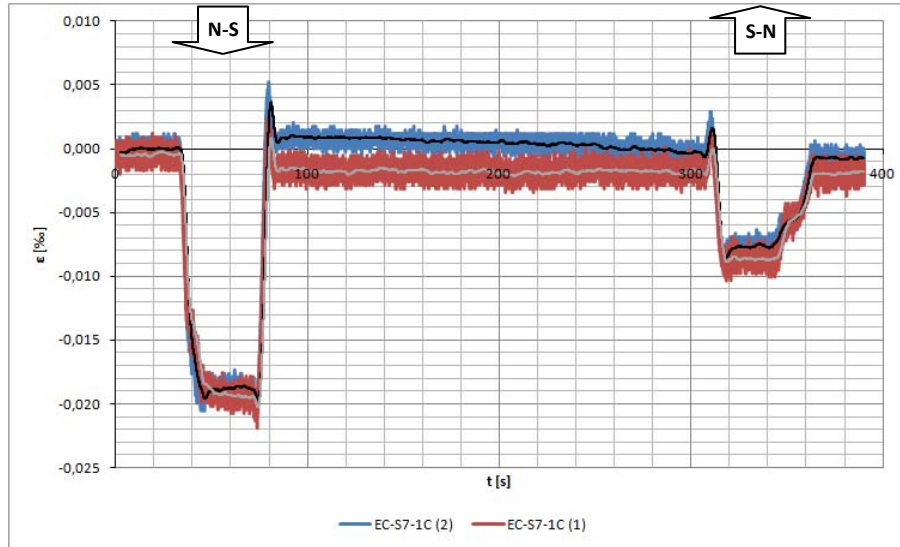


Fig. 6.26 – Extensões lidas com os sensores EC-S7-1C (2) e EC-S7-1C (1).

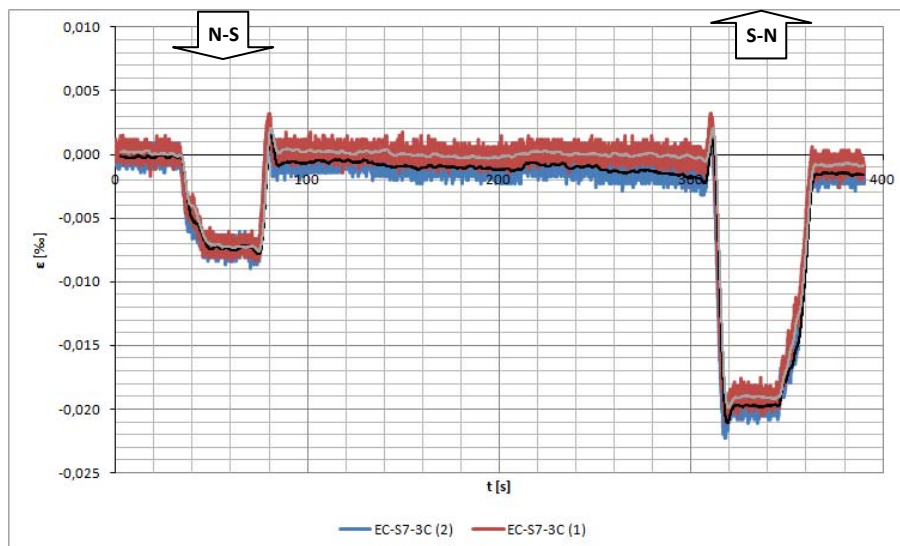


Fig. 6.27 – Extensões lidas com os sensores EC-S7-3C (2) e EC-S7-3C (1).

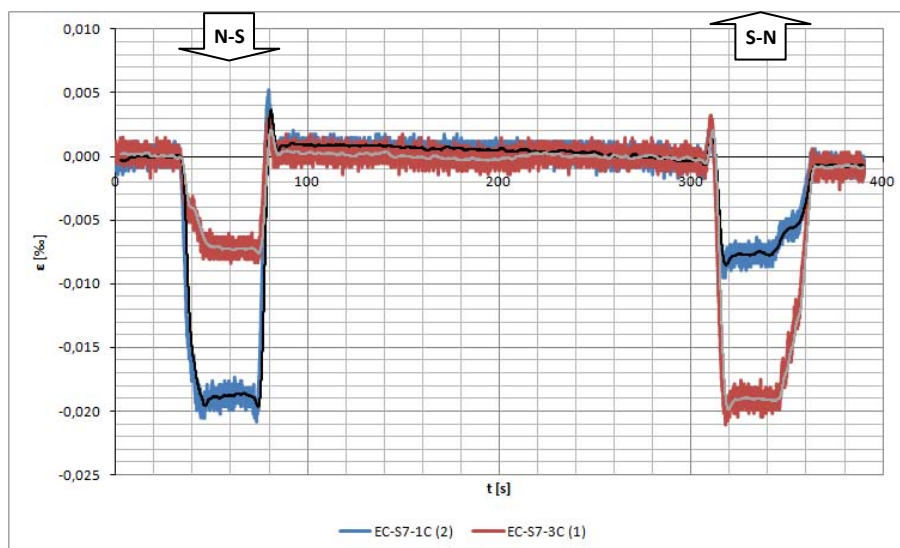


Fig. 6.28 – Extensões lidas com os sensores EC-S7-1C (2) e EC-S7-3C (1).

Por último apresenta-se a curva de extensões em ordem ao tempo de um extensómetro de embeber localizado sobre o pilar. Ao contrário dos extensómetros de embeber anteriores, que apresentavam extensões de compressão visto estarem localizados numa secção a meio vão, o sensor EB-S7-3E encontra-se solicitado à tracção. A resposta deste é também satisfatória em ambas as passagens. Por localizar-se no alinhamento 3 seria de esperar que o nível de extensão de tracção fosse superior aquando da segunda passagem, e tal verificou-se uma vez que se registou um primeiro patamar com extensões na ordem dos 0,001‰ e o segundo atingiu os 0,004‰.

Conhecido o valor de extensão de tracção no betão é possível aproximar um diagrama de extensões do alinhamento 3 para a paragem do metro quando este circula com sentido S-N, Fig. 6.30. Contudo deve ser referido que o rigor deste diagrama é inferior ao traçado anteriormente para a secção S6. Na Fig. 6.30 inclui-se o diagrama de extensões de referência (Sousa et al., 2006).

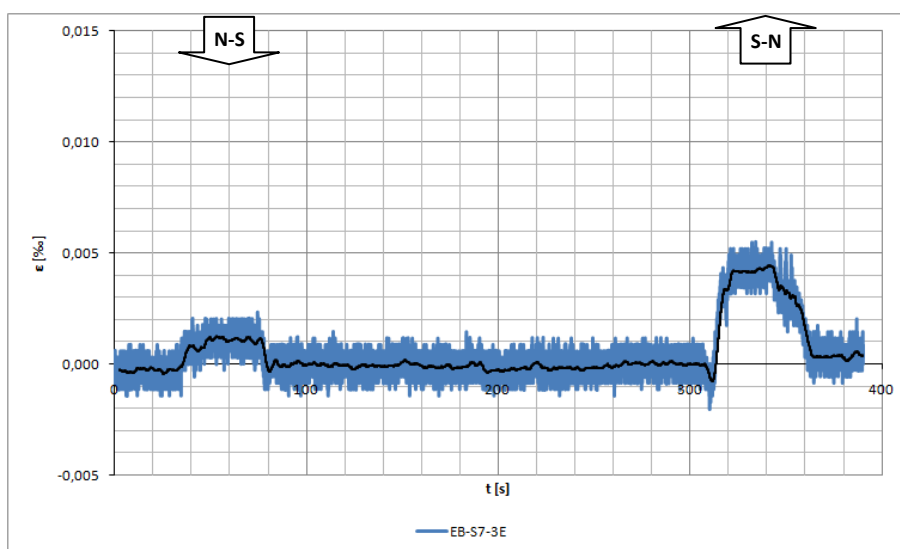


Fig. 6.29 – Extensões lidas com o sensor EB-S7-3E.

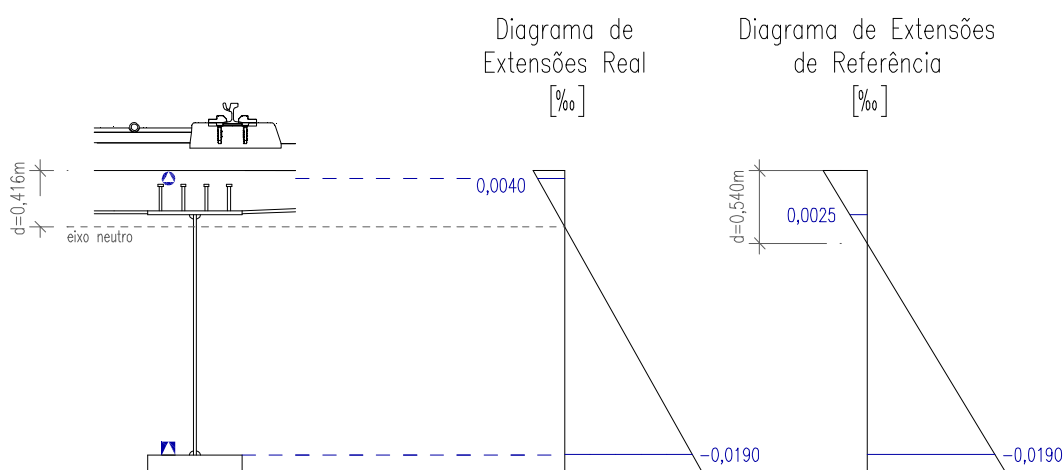


Fig. 6.30 – Diagrama de extensões na Secção S7 (alinhamento 3 paragem sentido S-N).

### Secção S8

No que concerne aos valores obtidos nos extensómetros na Secção S8 (ver Fig. 6.31), a diferença do comportamento destes quando comparado com os da Secção S6 deve-se ao facto de se tratar do último vão do viaduto. Assim, para a primeira passagem, quando o metro dá entrada na estação, a deformada da estrutura é tal que o banzo inferior do perfil metálico é traccionado. Contudo, visto este parar no lado oposto da estação, no instante da paragem a Secção S8 encontra-se traccionada nas fibras superiores e comprimida nas inferiores. Relativamente à segunda passagem, dado o sentido de circulação ser o inverso, inicialmente o sensor detecta extensões de compressão, e só quando o metro já se encontra em direcção à Maia é que aquele é traccionado. Nesta secção o problema reside na resposta do sensor EC-S8-1D. De acordo com os valores adquiridos este sensor não foi submetido a qualquer variação de extensão, o que indica que se encontra inutilizável para futuras campanhas de monitorização.

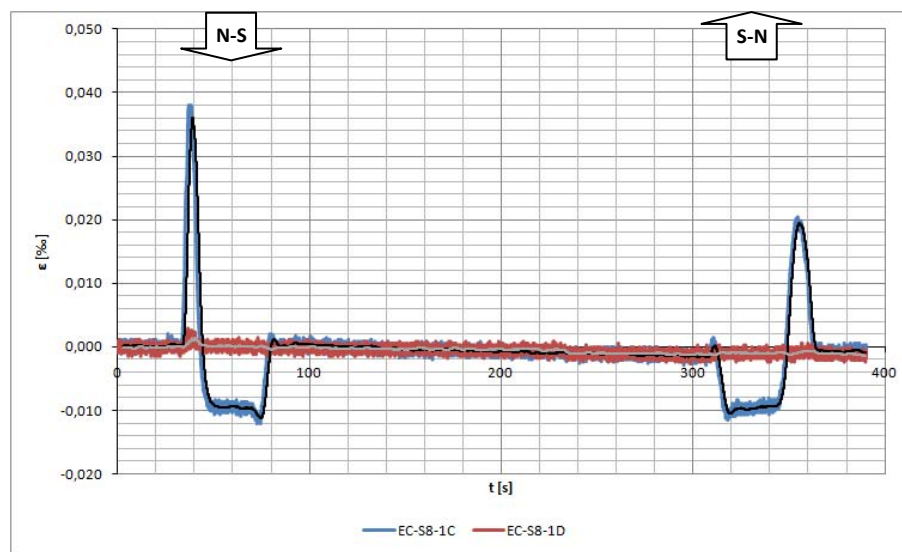


Fig. 6.31 – Extensões lidas com os sensores EC-S8-1C e EC-S8-1D.

#### 6.5.2. ENSAIO 2 – PASSAGENS NA ZONA A

À semelhança do que foi feito no Ensaio 1, apresenta-se de seguida a análise da rede de sensores instalada na Zona A. Conforme foi referido no ponto Procedimento do Ensaio o objectivo da análise destas duas passagens prende-se única e exclusivamente com a avaliação do estado dos extensómetros instalados nas Secções S1, S2, S3 e S4, de modo a perceber se é necessário proceder à substituição de alguns destes sensores na eventualidade da Metro do Porto pretender realizar no futuro um ensaio de carga neste viaduto.

### Secção S1

Os extensómetros utilizados na Secção S1 localizam-se no banzo superior e inferior do perfil metálico localizado no alinhamento 1, que é mais solicitado aquando da passagem do metro no sentido N-S. De acordo com a Fig. 6.32 a extensão de compressão no banzo inferior é de 0,032‰ na primeira passagem e de 0,011‰ na segunda, enquanto no banzo superior estas são igualmente de compressão com o valor de 0,001‰ e 0,0005‰, para os sentidos N-S e S-N, respectivamente.

Conclui-se, assim, que ambos os sensores se encontram em perfeitas condições.

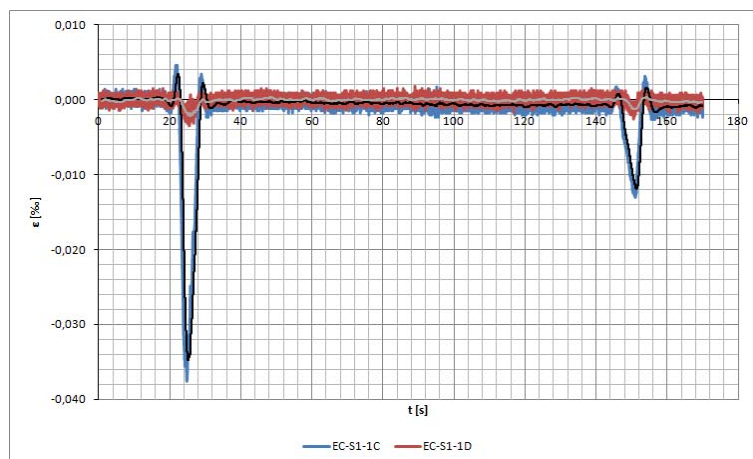


Fig. 6.32 – Extensões lidas com os sensores EC-S1-1C e EC-S1-1D.

### Secção S2

A análise da rede de sensores localizada na Secção S2 inicia-se pela comparação das medições dos sensores EC-S2-3C e EC-S2-1C. Segundo a Fig. 6.33 estes realizam medições iguais de extensão caso seja o alinhamento 1 o mais solicitado ou o alinhamento 3, o que indica o bom desempenho dos sensores.

Relativamente aos extensómetros EB-S2-3E e EB-S2-1E (ver Fig. 6.34), a resposta destes não foi satisfatória. O sensor EB-S2-1E evidencia um aumento de extensão de compressão para a segunda passagem. Ora dada a sua localização seria de esperar que este fosse mais sensível a variações de extensão causadas na primeira passagem do metro, e tal não se verificou. Por outro lado, o comportamento do extensómetro EB-S2-3E parece indiferente à passagem do metro. Deve ser referido que estas constatações não implicam necessariamente que os sensores não se encontrem em bom estado, dado tratar-se de sensores de embeber localizados em zonas onde o nível de extensão a medir é bastante reduzido. É assim aconselhável realizar ensaios de carga de modo a conseguirem-se medições mais bem definidas dos níveis de deformação da laje de betão.

Por último apresenta-se a Fig. 6.35, a qual representa o nível de extensão em função do tempo do banzo superior da viga metálica situada segundo o alinhamento 3. A resposta medida no sensor EC-S2-3D foi satisfatória, tendo-se obtido um valor de extensão de compressão de aproximadamente 0,002%, valor congruente com os apresentados nos diagramas de extensão traçados no ensaio anterior.

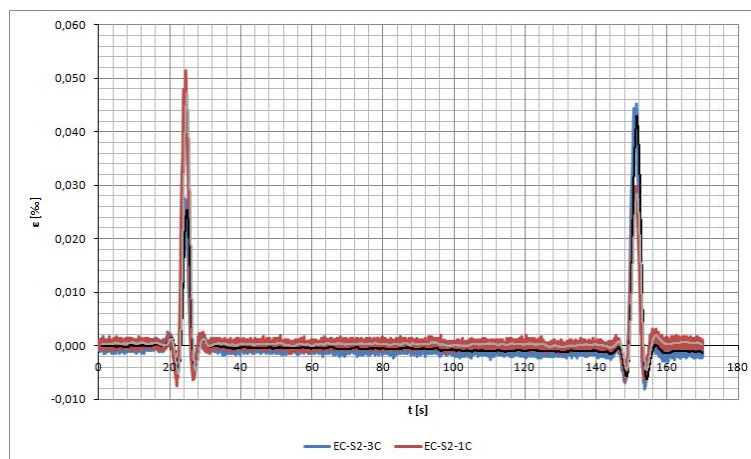


Fig. 6.33 – Extensões lidas com os sensores EC-S2-3C e EC-S2-1C.

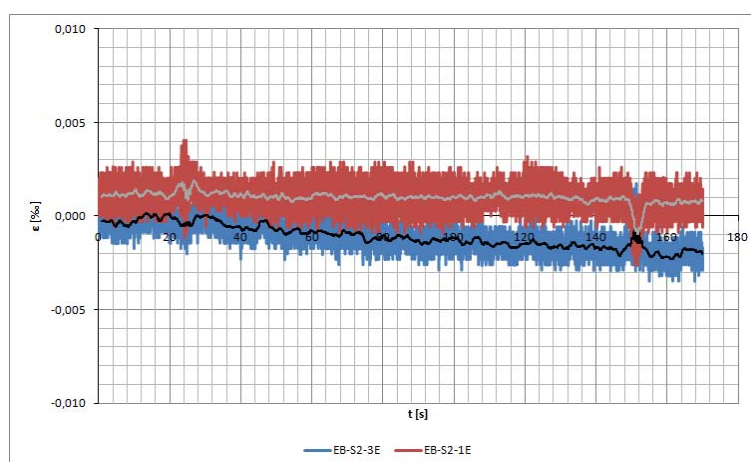


Fig. 6.34 – Extensões lidas com os sensores EB-S2-3E e EB-S2-1E.

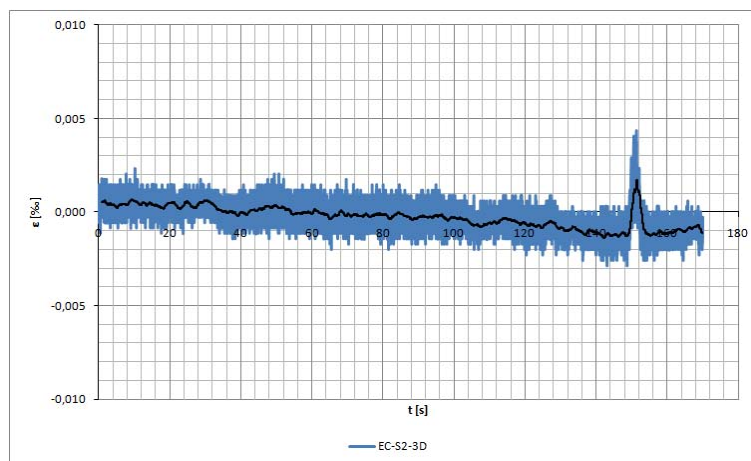


Fig. 6.35 – Extensões lidas com o sensor EC-S2-3D.

Apresentam-se ainda as Fig. 6.36 e Fig. 6.37, as quais apresentam as extensões medidas no alinhamento 1 e 3, respectivamente. Nestas podem ser observadas a distribuição de deformações nos diferentes alinhamentos e comprovar que no caso de circulação do metro com duas composições os valores de extensões registados são praticamente o dobro dos debatidos no ensaio anterior.

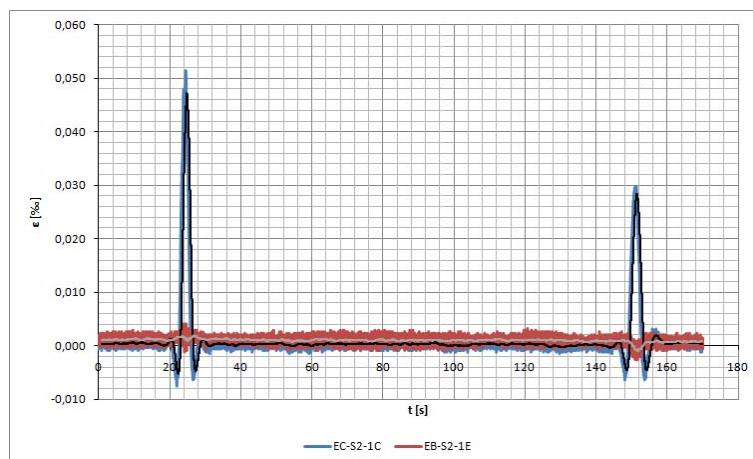


Fig. 6.36 – Extensões lidas com os sensores EC-S2-1C e EB-S2-1E.

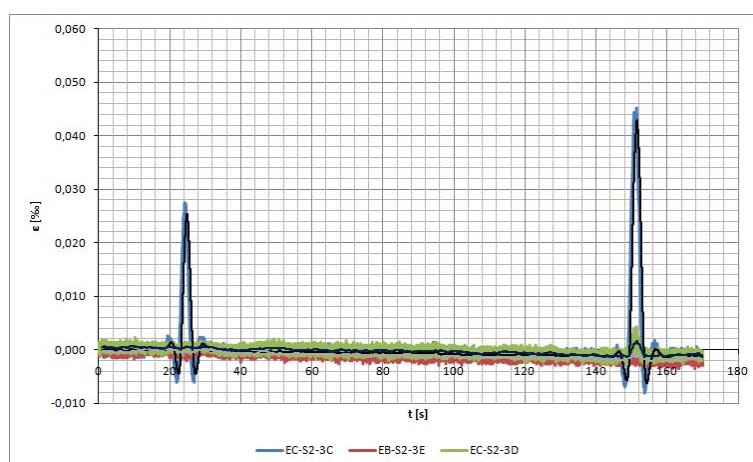


Fig. 6.37 – Extensões lidas com os sensores EC-S2-3C, EB-S2-3E e EC-S2-3D.

### Secção S3

A Secção S3 localiza-se sobre o pilar P7, e nesta instrumentou-se não só o tabuleiro, mas também o perfil HEB localizado entre os braços Y do pilar.

Nas extremidades do tirante instalaram-se quatro extensómetros de colar, estando dois mais próximos do alinhamento 1 e outros dois do alinhamento 3. Relativamente à sua localização em altura dividiram-se estes pelo banzo superior e inferior do perfil. De acordo com o que foi referido no ensaio anterior é de esperar maiores extensões no alinhamento B do que no A. Os gráficos da Fig. 6.38, Fig. 6.39, Fig. 6.40 e Fig. 6.41 apresentam as extensões medidas neste e destas conclui-se que todos os sensores instalados se encontram a medir correctamente o estado de deformação.

Relativamente às vigas metálicas do tabuleiro instrumentou-se a viga do alinhamento 1. Na Fig. 6.42 denota-se claramente que o extensómetro EC-S3-1D colado ao banzo superior se encontra danificado, enquanto na Fig. 6.43 se representa novamente a curva do sensor EC-S3-1C e se verifica que este efectua medições de extensões coerentes.

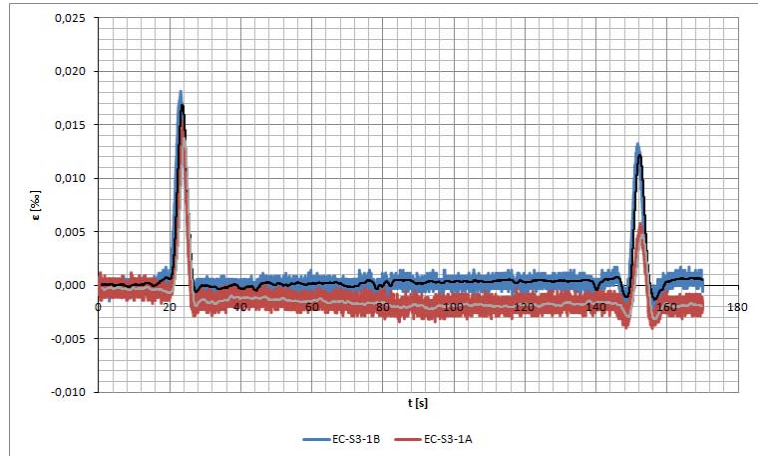


Fig. 6.38 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-1B e EC-S3-1A.

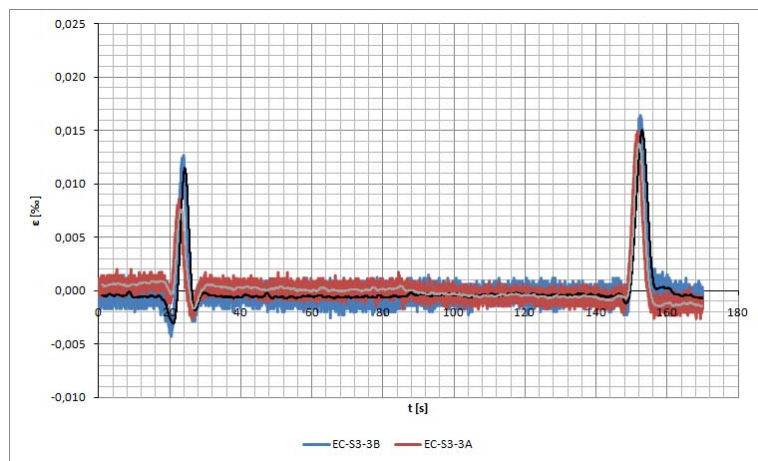


Fig. 6.39 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-3B e EC-S3-3A.

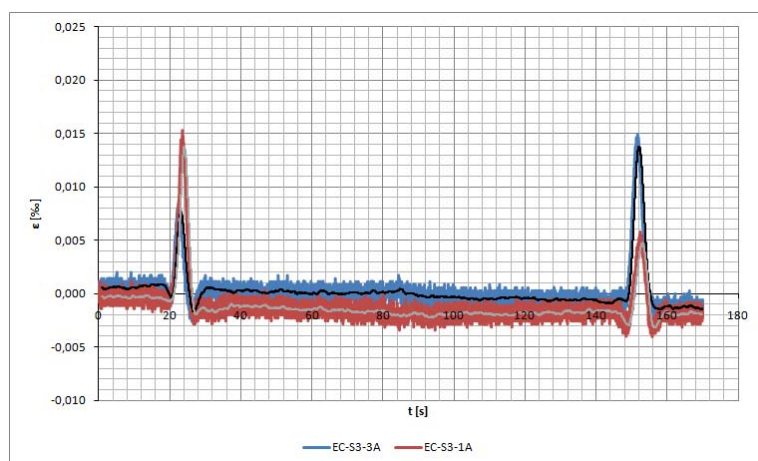


Fig. 6.40 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-3A e EC-S3-1A.

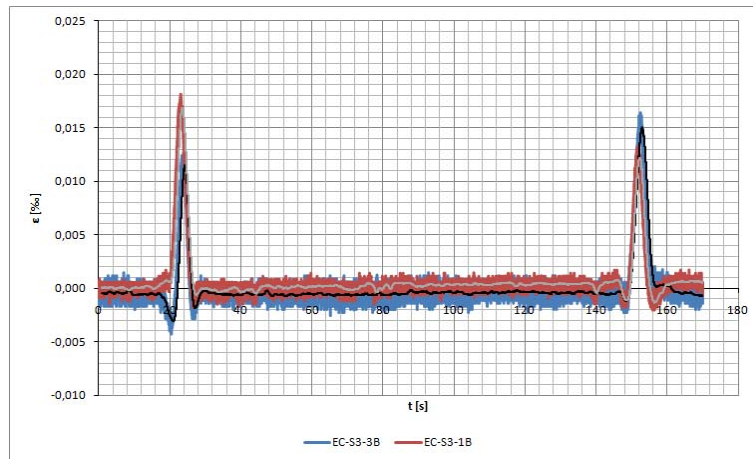


Fig. 6.41 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-3B e EC-S3-1B.

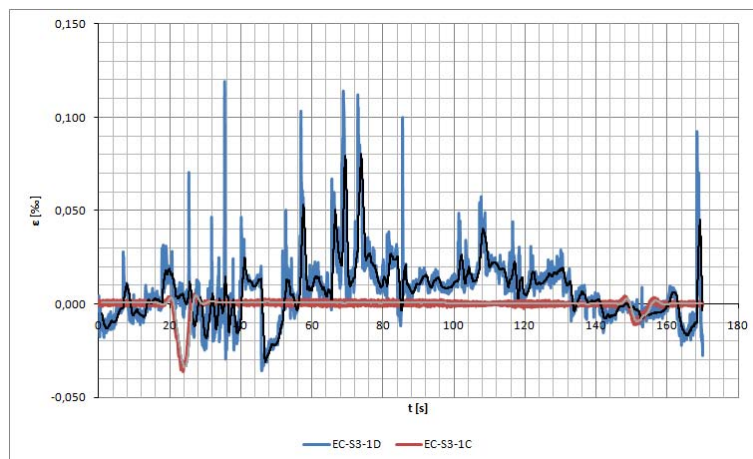


Fig. 6.42 – Extensões lidas com os sensores EC-S3-1D e EC-S3-1C.

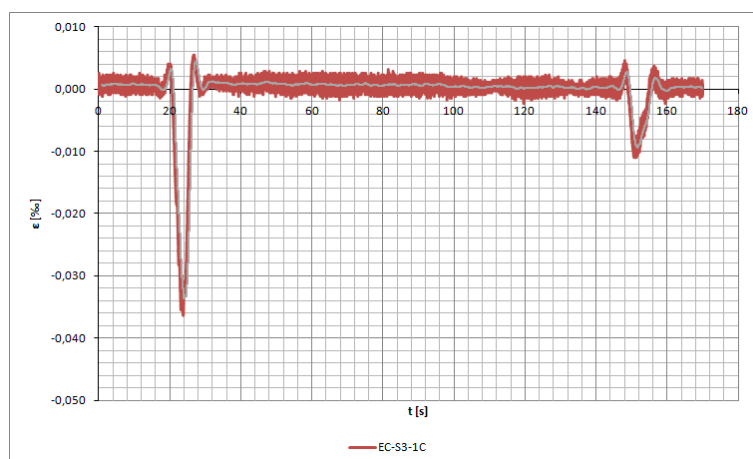


Fig. 6.43 – Extensões lidas com o sensor EC-S3-1C.

### Secção S4

A resposta dos sensores EC-S4-1D e EC-S4-1C vai de encontro às análises já realizadas para secções localizadas a meio vão. Dado o vão do tramo em que se localiza a Secção S4 ser inferior ao do da Secção S2, o máximo valor da extensão de tracção no tabuleiro neste caso é igual a 0,040‰, inferior aos 0,048‰ lidos anteriormente.

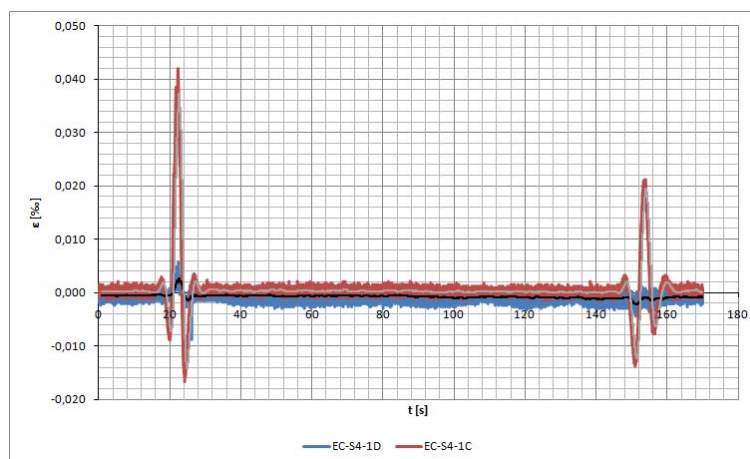


Fig. 6.44 – Extensões lidas com os sensores EC-S4-1D e EC-S4-1C.

## 6.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo avaliou-se o desempenho de um sistema de monitorização localizado num viaduto do Metro do Porto. Este caso de estudo permitiu tomar contacto com o tema da instrumentação e monitorização segundo uma lógica de abordagem diferente, onde a complexidade da estrutura se traduz num aumento da dificuldade de avaliação das grandezas a monitorizar, e consequentemente em sistemas de monitorização mais avançados.

Debateram-se técnicas de instalação de sensores, a qualidade do sinal e a eventual necessidade de tratar a informação de forma a torná-la mais clara e objectiva.

Nos ensaios conduzidos que aqui se reproduziram procurou-se avaliar resultados provenientes de um sistema de monitorização cuja rede de sensores era essencialmente constituída por extensómetros. Aferiu-se sobre a qualidade das leituras interpretando os valores obtidos, compararam-se o desempenho dos extensómetros de colar com os dos extensómetros de embeber no betão, e avaliou-se o estado dos mesmos para futuras campanhas de monitorização do viaduto.

Concluiu-se que os extensómetros EC-S6-1C, EC-S8-1D e EC-S3-1D deveriam ser substituídos pelo facto de não se encontrarem a realizar medições coerentes. Uns apresentaram valores distorcidos do estado de extensão, por não estarem solidarizados com a estrutura, devendo por isso ser revista a interface entre estes, e outros encontram-se totalmente danificados, sendo que a solução a tomar passa pela sua substituição. Relativamente aos extensómetros de embeber no betão, não foi possível averiguar com precisão o seu desempenho, nomeadamente dos localizados na Zona A, uma vez que nesta zona a circulação do metro se faz a velocidade considerável. No que concerne aos extensómetros de embeber localizados na estação do Parque da Maia o respectivo desempenho foi satisfatório, e permitiu traçar alguns diagramas de extensão em conjunto com os demais extensómetros de colar interrogados, os quais foram validados quando comparados com os valores sugeridos pela bibliografia.



# 7

## CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1. CONCLUSÕES

Enquadrado pela reconhecida necessidade de avaliar o comportamento das estruturas após a sua construção e durante a sua fase de exploração, a dissertação que agora termina constitui, assim, uma contribuição para o conhecimento das potencialidades de diversos sistemas de monitorização na interpretação e diagnóstico do comportamento daquelas. Explorando novos equipamentos, fruto dos desenvolvimentos experienciados pela área emergente que é a monitorização de estruturas, e estudando as características de alguns sistemas existentes, através de aplicações laboratoriais e em obra, procurou-se dar resposta aos objectivos deste trabalho.

O primeiro objectivo centrou-se na descrição dos aspectos teóricos e apresentação sumária das características e potencialidades dos sistemas de monitorização, uma vez que se pretende que estes se afirmem cada vez mais como uma solução no estudo da condição e estado de estruturas. Consequentemente, do ponto de vista do autor, tornou-se necessário desenvolver quais as grandezas estruturais relevantes a controlar e qual a melhor forma de o fazer, bem como descrever as diferentes partes constituintes de um sistema de monitorização de integridade estrutural, visto tal ser indispensável para o entendimento do seu funcionamento.

A Civiónica pode ser descrita como uma área que resulta da aplicação da electrónica à engenharia civil, isto é, trata-se de uma disciplina que se baseia na concepção e adequada utilização da electrónica, seus conhecimentos e equipamentos, nas infra-estruturas de transportes e outras obras do sector da construção. Foi neste contexto de evolução, interacção e integração de áreas diferentes da engenharia que, no âmbito do projecto “Civiónica – Uma Área Interdisciplinar Emergente”, do programa “Iniciação à Investigação” da Universidade do Porto, se realizaram na unidade de investigação LABEST os Capítulos 3, 4, 5 e 6 deste documento.

Em primeiro lugar, no Capítulo 3 apresentou-se o caso de estudo laboratorial e resumiram-se os procedimentos a realizar. Este consistiu num perfil metálico HEB100 simplesmente apoiado, carregado nos terços de vão de forma cíclica ou em ensaios por patamares com auxílio de um actuador hidráulico manual ligado a uma célula de carga previamente calibrada. A selecção do tipo de sensores a utilizar foi feita em função das suas potencialidades e dos objectivos que se pretendiam atingir. De facto, a importância da rede de sensores num sistema de monitorização é crucial e foi justamente nessa óptica que se inseriu o Capítulo 4, onde se apresentou o funcionamento de sensores eléctricos clássicos, medidores de grandezas como extensões, rotações e flechas, e se avaliou o seu desempenho

recorrendo à sua comparação com valores teóricos obtidos da Resistência de Materiais e de um modelo numérico.

No que concerne ao estudo da deformação axial no demonstrador laboratorial, os extensómetros das secções S1 e S3 apresentaram leituras praticamente coincidentes para ensaios cíclicos de carga/descarga, com desvios em relação aos valores retirados da equação constitutiva de *Hooke* de 4% e 6%, enquanto na secção S2 esse mesmo desvio relativo foi inferior, 1% a 4%. Foi também avaliada a linearidade da resposta da rede de extensómetros através de ensaios por patamares, a qual se revelou positiva. Relativamente à comparação entre os valores adquiridos em laboratório e aqueles obtidos da modelação em elementos finitos, para uma força de 50kN, obtiveram-se valores de desvios semelhantes aos supracitados nas secções S1 e S3, enquanto na Secção S2 o desvio determinado foi menor, dos 0% aos 3%. Pese embora a incerteza na definição dos valores dos factores de ganho dos diferentes extensómetros e as técnicas de colagem utilizadas diferirem de caso para caso, a resposta dos extensómetros eléctricos, para o caso de leituras estáticas, apresentou elevada repetibilidade, estabilidade e linearidade

A medição de rotações de apoio também veio comprovar a elevada qualidade da resposta dos inclinómetros eléctricos. Com valores relativamente próximos entre o Método da Integração da Elástica e os fornecidos pela rede de sensores, os desvios obtidos de 2% para o inclinómetro do apoio da esquerda e 8% para o da direita, deveram-se a uma questão de má centragem da carga. Na comparação da resposta destes aparelhos com o modelo numérico, concluiu-se que os valores retirados em laboratório com o inclinómetro esquerdo e direito balizavam o previsto pelo programa, com desvios de -2% e 3%, respectivamente.

Para terminar as conclusões do Capítulo 4, estudou-se um sensor medidor de flechas, o LVDT. Ao desprezar a deformação por corte, os valores previstos pelo Método da Unidade Fictícia de Carga afastaram-se consideravelmente das flechas medidas, as quais eram cerca de 1,3 vezes superiores. Contudo, a simulação numérica conduzida veio comprovar que para um valor de força de 50kN o deslocamento obtido pelo sensor foi apenas aproximadamente 2% superior ao previsto pelo programa. Quando comparado com o procedimento por patamares o desvio obtido foi de -14% para 10kN e dos 20 aos 50kN variou entre -1% e 1%, validando também este sensor como um dos mais indicados para controlo de deslocamentos, neste caso verticais, em estruturas.

No Capítulo 5 procurou-se avaliar a consistência de resultados de diferentes tipos de extensómetros de fibra óptica, comparando estes entre si e também com valores obtidos de extensómetros convencionais de resistência eléctrica e com o modelo numérico da viga. Pretendeu-se com este estudo perceber se estes extensómetros poderiam ser considerados uma solução para futuros trabalhos desenvolvidos pelo LABEST. Os extensómetros de Bragg utilizados foram o *standard polyimide strain sensor* e o *miniature strain sensor* da marca *FiberSensing*, e o *bare strain sensor* da empresa *WellTech*. Neste estudo comparativo verificou-se que os primeiros dois extensómetros apresentavam uma relação perfeitamente linear entre si, sendo o desvio entre estes de apenas 1%. Por outro lado, apresentaram variações em relação ao sensor eléctrico utilizado como referência de 5%, enquanto em relação ao modelo de elementos finitos o desvio ascendia aos 8% e 10%, respectivamente. De referir que o desvio de 8% diz respeito ao *standard polyimide strain sensor*, enquanto o de 10% ao *miniature strain sensor*. Relativamente ao extensómetro da *WellTech* concluiu-se que este não é actualmente uma solução para trabalhos de monitorização a realizar pela equipa do LABEST, sendo necessário corrigir o problema do mau desempenho da interface sensor/estrutura e realizar mais testes de modo a aferir sobre a sua viabilidade para futuras campanhas de instrumentação.

Por último, no Capítulo 6 abordou-se o caso de estudo de um viaduto do Metro do Porto pela importância que assumia o acompanhamento do seu comportamento estrutural. Neste introduziu-se o tema da monitorização e instrumentação de obras numa escala real, com adversidades e problemas diferentes, debateram-se técnicas de instalação de sensores e a qualidade do sinal destes. Comparou-se também a informação obtida dos ensaios realizados com valores obtidos em campanhas de monitorização passadas e com um modelo numérico do viaduto, trabalhos anteriores desenvolvidos pelo LABEST. De facto, a complexidade da estrutura traduziu-se na instalação de um sistema de monitorização também ele mais avançado e num aumento de dificuldade da avaliação da grandeza a monitorizar. Contudo, foi possível interpretar a informação interrogada da rede de extensómetros, constituída por extensómetros de colar e de embeber no betão, traçando-se diagramas de extensões em secções consideradas críticas. Deste modo, os ensaios conduzidos nesta dissertação constituem também informação relevante para futuros estudos a realizar na estrutura.

Conforme referido anteriormente, a instalação de redes de sensores eléctricos e ópticos, o modo de funcionamento e particularidades destes, a escolha do sistema de aquisição dependendo do tipo de campanha de monitorização em questão, a ligação entre a rede de sensores e este último, a recolha e tratamento da informação interrogada, bem como a análise desta de um ponto de vista estrutural foram aspectos abordados ao longo deste trabalho que se consideram fulcrais e determinantes num processo de aprendizagem de uma área emergente como a Civiónica.

## 7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Foi realçada a importância da aplicação de sistemas de monitorização à interpretação e análise do comportamento estrutural. Contudo, a utilização da informação que tais sistemas colocam à disposição está ainda muito aquém das suas potencialidades e depende muito de futuros desenvolvimentos.

O permanente desenvolvimento de novos componentes na área da instrumentação de estruturas exige uma constante actualização do conhecimento sobre as características técnicas dos equipamentos disponíveis. No âmbito deste projecto procurou-se realizar isso mesmo através da utilização do *CompactRIO* em laboratório, contudo as aplicações deste não foram frutíferas. Recomenda-se, assim, o desenvolvimento de trabalhos em estruturas simples, cujos objectivos sejam explorar as diferentes cartas deste sistema modular e elaborar códigos de aquisição próprios para este sistema.

Por outro lado, os progressos na área das comunicações traduziram-se num igual crescimento dos designados sensores sem fios, explorados de um ponto de vista teórico nesta dissertação. Em termos de alcance e precisão as redes *wireless* têm vindo a ser substancialmente melhoradas e os seus custos reduzidos, devendo por isso a aplicação desta tecnologia ser alvo de futuros trabalhos a realizar pelo LABEST. Nestes deverão abordar-se questões como o consumo de energia, maior obstáculo deste tipo de redes, e testar diferentes arquitecturas para avaliar a confidencialidade, alcance e latência na transmissão de sinal.

No âmbito da exploração de novos sensores, deverá dedicar-se atenção especial aqueles que medem parâmetros relacionados com a durabilidade das estruturas, como a corrosão de armaduras em estruturas de betão armado. A fiabilidade de tais sensores passa pela realização de ensaios laboratoriais de caracterização da integridade deste tipo de estruturas. Por outro lado, é igualmente desafiador estudar a durabilidade dos próprios sensores. Para tal, deverão ser realizados ensaios laboratoriais de envelhecimento face a condições ambientais adversas e em ciclos sucessivos de carga/descarga. Nestes procedimentos é igualmente importante avaliar o desempenho da interface sensor/estrutura daí as características desta merecerem especial destaque.

No que concerne ao estudo desenvolvido com sensores eléctricos existentes em mercado e mais correntemente utilizados em aplicações de engenharia civil, avaliou-se a qualidade das suas leituras num perfil metálico. Do ponto de vista do autor, seria interessante realizar a mesma análise comparativa num demonstrador laboratorial cuja viga fosse de betão armado. Por outro lado, a realização de ensaios com um sistema de carregamento diferente do utilizado nesta dissertação permitiria aplicar ciclos de carga mais longos, com patamares também mais demorados e valores de força aplicada normalizados. Deste modo, poder-se-ia avaliar a resposta da mesma rede de sensores aos efeitos da variação térmica, aferir melhor sobre o desempenho das interfaces sensores/estrutura devido às diferentes técnicas de colagem dos extensómetros eléctricos e ópticos, entre outros aspectos.

Conforme o Anexo B evidencia, realizaram-se ensaios num último momento da dissertação com vista à aplicação da tecnologia MEMS, cuja teoria foi avançada no Capítulo 2. Contudo, face a condicionantes temporais e dada também a falta de tradição em ensaios dinâmicos, estes mesmos ensaios revelaram-se inconclusivos. Assim, a avaliação do desempenho de acelerómetros capacitivos do tipo MEMS e a sua comparação com sensores do tipo piezoeléctricos deverão ser considerados futuros desenvolvimentos de elevado interesse para aprofundar o conhecimento numa tecnologia que apresenta vantagens competitivas bastante atractivas.

A monitorização de estruturas pode ainda ser relevante no estudo do comportamento das estruturas de betão nas primeiras idades, nomeadamente no que concerne à avaliação das suas propriedades de resistência e de deformabilidade, permitindo assim ajustar modelos numéricos que actualmente carecem de informação a este nível.

Por último, a determinação das características mecânicas das fibras ópticas, o processo de transmissão das deformações e a calibração dos sensores de Bragg à deformação, e fundamentalmente à temperatura, constituem aspectos de grande importância a estudar. Nos ensaios conduzidos neste trabalho a questão da elevada sensibilidade dos sensores ópticos ao efeito da temperatura não foi abordada pelo que se recomenda em futuros projectos analisar esta questão. Do ponto de vista do autor é igualmente importante realizar ensaios laboratoriais com sensores da *WellTech* e experimentar a técnica de fixação proposta pela empresa. Pese embora o processo de abrir janelas num sensor óptico seja merecedor de cuidados especiais, a *WellTech* fornece equipamento especial para o realizar. Desta forma, face à competitividade económica dos mesmos, considera-se interessante avaliar a viabilidade de tal solução. Ainda relativamente a estes sensores ópticos, recomenda-se a realização de ensaios de calibração de modo a aferir sobre a sua sensibilidade à deformação. No estudo desenvolvido no Capítulo 5, referiram-se as inúmeras vantagens que esta tecnologia exhibe face à instrumentação eléctrica. Consequentemente, recomenda-se avaliar a resposta dos sensores em ambiente de obra à semelhança do caso de estudo apresentado nesta dissertação, uma vez que o futuro da monitorização de estruturas passa pela sua utilização.

**BIBLIOGRAFIA**

- Beer, F., Russell, J (1995). *Resistência dos Materiais*. MAKRON Books do Brasil Editora, São Paulo
- Beer, F., Russell, J. (2006). *Mecânica Vectorial para Engenheiros: Estática*. McGraw Hill, Rio de Janeiro
- Bisby, L. (2005). ISIS and SAMCO Educational Module 5: An Introduction to Structural Health Monitoring. 08/2005, Queen's University
- Bischoff, R., Meyer, J., Feltrin, G. (2009). Chapter 69 Wireless Sensor Network Platforms. In *Systems and System Design*, John Wiley & Sons, New York City
- Bradley, J. (2001). Design of Surface Micromachined Compliant MEMS. Master Thesis, Iowa State University
- Cacchione, F. (2007). Mechanical Characterization and Simulation of fracture processes in polysilicon Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Doctoral Thesis, Politecnico de Milano
- Cavadas, F., (2008). *Monitorização e Análise do Comportamento de Pontes Metálicas Antigas – A Ponte Eiffel*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Cho, S., Yun, C., Lynch, J., Zimmerman, A., Spencer Jr., B., Nagayama, T. (2008). *Smart Wireless Sensor Technology for Structural Health Monitoring of Civil Structures*. IJOSS, 11/08/2008, 267-275
- Dally, J., Riley, W., McConnell, K. (1993). *Instrumentation for Engineering Measurements*. John Wiley & Sons, New York City
- Desai, J. (2007). Using a strain-gauge transducer in a Wheatstone bridge configuration. EETimes-India, 16/11/2007
- Farhey, D. (2005). *Bridge Instrumentation and Monitoring for Structural Diagnostics*. Structural Health Monitoring – An International Journal, 301-318, SAGE Publications, Dayton, OH
- Faria, R. (2008). *Procedimentos com vista à Monitorização de Estruturas – Teste do Sonar e Ensaio da Ponte do Pinhão*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Félix, C. (2002). *Monitorização do Comportamento de Estruturas de Betão*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Félix, C. (2004). *Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Ferreira, A., Araújo, F., Maia, A., Alves, P., Santos, J. (2004). *Redes de Bragg em Fibra Óptica – Contribuições para o desenvolvimento de uma tecnologia revolucionária em Monitorização Estrutural*. Encontro Nacional Betão Estrutural 2004, 17-19/11/2004, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Figueiredo, E., (2006). *Monitorização e Avaliação do Comportamento de Obras de Arte*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Frazão, O., Araújo, F., Dias, I., Ferreira, L., Santos, J (2005). *Sensores de Bragg em Fibra Óptica*. Terceiras Jornadas de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores, 17-18/11/2005, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- Graver, T., Inaudi, D., Doornink, J. (2004). *Growing Market Acceptance for Fiber-Optic Solutions n Civil Structures*. Fiber Optic Sensor Technology and Applications III, 26/10/2004, Philadelphia, PA

- Güemes, A. (2002). *Fiber Optics Sensors. Health Monitoring Techniques: an overview*. First European Workshop on Structural Health Monitoring, 10-12/07/ 2002, École Normale Supérieure de Cachan
- Hejll, A. (2007). *Civil Structural Health Monitoring - Strategies, Methods and Applications*. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology
- Hsu, T. (2006). *Reliability in MEMS packaging*. 44th International Reliability Physics Symposium. 26-30/03/2006, San Jose, CA
- Juvandes, L. (2002). *Resistência de Materiais 2 – Aulas Teóricas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Juvandes, L. (2004). *Resistência de Materiais 1 – Aulas Teóricas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Mahadevan, S., Guratzsch, R., (2007). *Sensor Placement Design for SHM Under Uncertainty*. Vanderbilt University. Nashville, TN
- McDonald, K. *Mobile-agent Based Wireless Sensing Network for Structural Health Monitoring (SHM)*. Los Alamos National Laboratory, Santa Fé, NM
- McNeill, D. (2004). *Novel Event Localization of SHM Data Analysis*. 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures. 381-389. 22-23/09/2004, Winnipeg, MB
- Michaels, J., Lu, Y. (2009). *Feature Extraction and Sensor Fusion for Ultrasonic Structural Health Monitoring Under Changing Environmental Conditions*. IEEE Sensors Journal, 11/11/2009, 1462-1471
- Mufti, A., Bakht, B., Humar, J., Jalali, J., Newhook, J., Rahman, S. (2001). *Guidelines for Structural Health Monitoring*. ISIS Canada. 09/2001, Manitoba
- Mufti, A., Rivera, E., Thomson, D., (2006). *Civionics Specifications for Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring*. The Arabian Journal for Science and Engineering, 06/2006, 241-248, ISIS Canada, Manitoba
- Lynch, J. (2004). *Overview of Wireless Sensors for Real-Time Health Monitoring of Civil Structures*. 4th International Workshop on Structural Control and Monitoring. 10-11/06/2004, New York City, NY
- Ramón, P., Webster, J. (2001). *Sensors and Signal Conditioning*. John Wiley & Sons, New York City
- Rezende, J. (2004). *Redes de Sensores sem Fios. Redes de Computadores II*. Universidade Federal do Rio de Janeiro
- Santos, S., Brito, J. (2000). *Inspeccionabilidade de Obras de Arte*. Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, 22-24/11/2000, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Sousa, H., Figueiredo, E., Félix, C., Figueiras, J. (2006). *Viaduto misto Parque da Maia – Sistema de monitorização permanente e Ensaio de carga*. 07/2006, LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Timoshenko, S. (1994). *Mecânica dos Sólidos*, LTC - Livros Técnicos e Científicos Rio de Janeiro
- Worden, K., Farrar, C., Manson, G., Park, G. (2007). *The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring*. The Royal Society, 03/04/2007, 1639-1664

<http://www.rdpe.com>. 03/2010  
<http://www.omega.com>. 03/2010  
<http://www.fibersensing.com>. 04/2010  
<http://www.picotech.com>. 03/2010  
<http://www.jewellinstruments.com>. 03/2010  
<http://www.pcb.com>. 06/2010  
<http://www.xbow.com>. 04/2010  
<http://www.sensorland.com>. 03/2010  
<http://www.freescale.com>. 03/2010  
<http://www.nationalinstruments.com>. 03/2010  
<http://www.memsnet.org>. 03/2010  
<http://www.datataker.com>. 03/2010  
<http://www.micronoptics.com>. 05.2010  
<http://www.welltechltd.com>. 05.2010  
<http://www.metrodoporto.pt>. 05/2010







# ANEXO A

## CAP.4 – ANÁLISE DE EXTENSÕES COMPLEMENTAR

### A.1. ENSAIO ESTÁTICO 2

Apresentam-se de seguida as medições realizadas nas secções S2 e S3, à semelhança do que foi realizado no Capítulo 4 para a secção S1.

#### Secção S2

Na Fig. A.1, observam-se os valores obtidos, sendo que a azul se representam os dados relativos ao sensor ERE5, a vermelho os do sensor ERE7, a verde o ERE10 e a roxo ERE12.

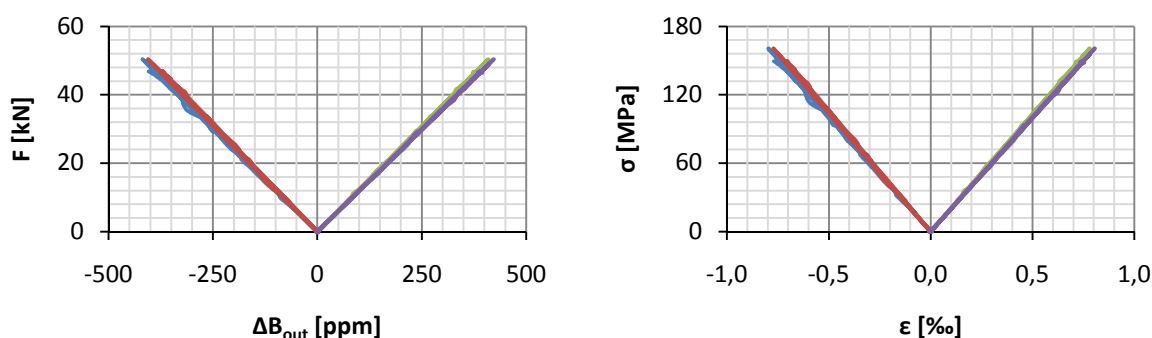


Fig. A.1 – Medições com Extensómetros Eléctricos, Secção S2.

#### Secção S3

A Fig. A.2 contém os dados adquiridos dos sensores ERE8 e ERE13, os quais estão representados pela cor azul e vermelho, respectivamente.

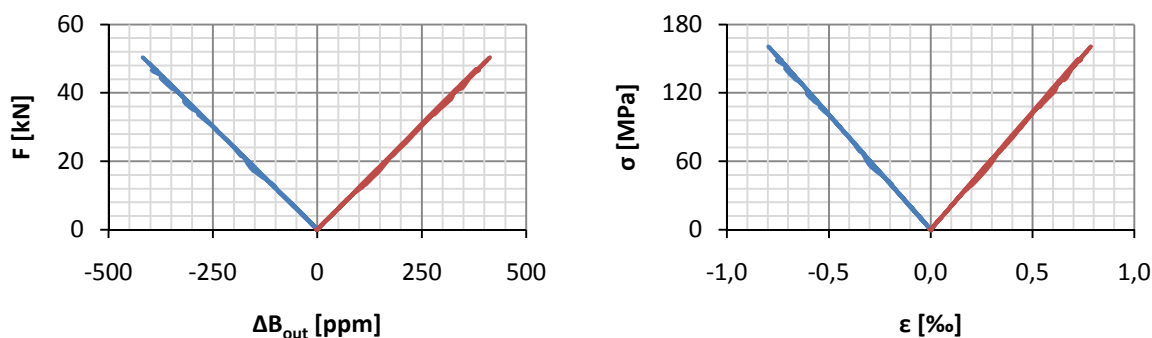


Fig. A.2 – Medições com Extensómetros Eléctricos, Secção S3.

De forma a avaliar a estimativa do módulo de elasticidade determinado no primeiro ensaio recorre-se às extensões medidas nos sensores ERE5, ERE7, ERE10 e ERE12 instalados na secção S2 e nos sensores ERE8 e ERE13 da secção S3.

**Secção S2**

Do estudo dos três carregamentos conclui-se que na secção S2 os erros relativos associados aos sensores ERE5 e ERE12 são os mais significativos, da ordem dos 4,5 e 5,5%, respectivamente (ver Fig. A.3, Fig. A.4 e Fig. A.5).

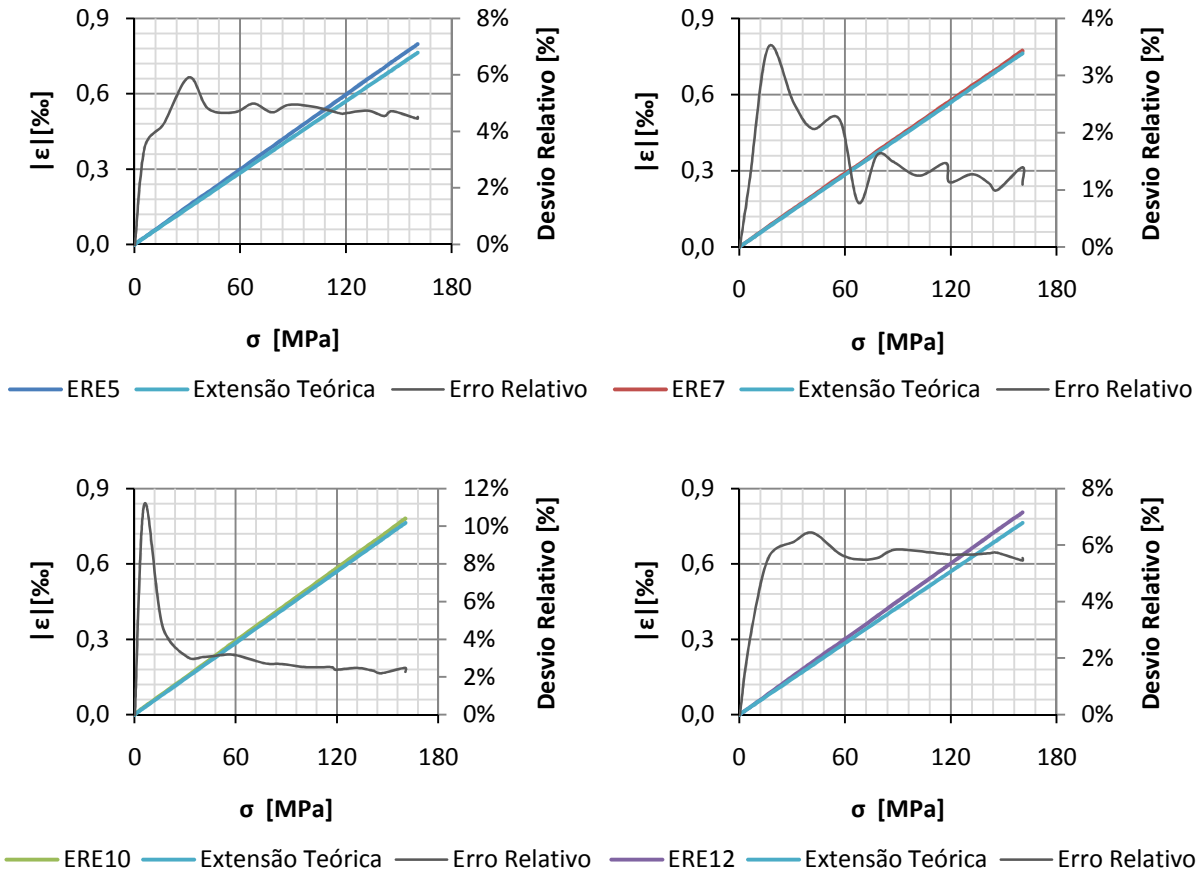


Fig. A.3 – Estudo do 1º Carregamento, Secção S2.

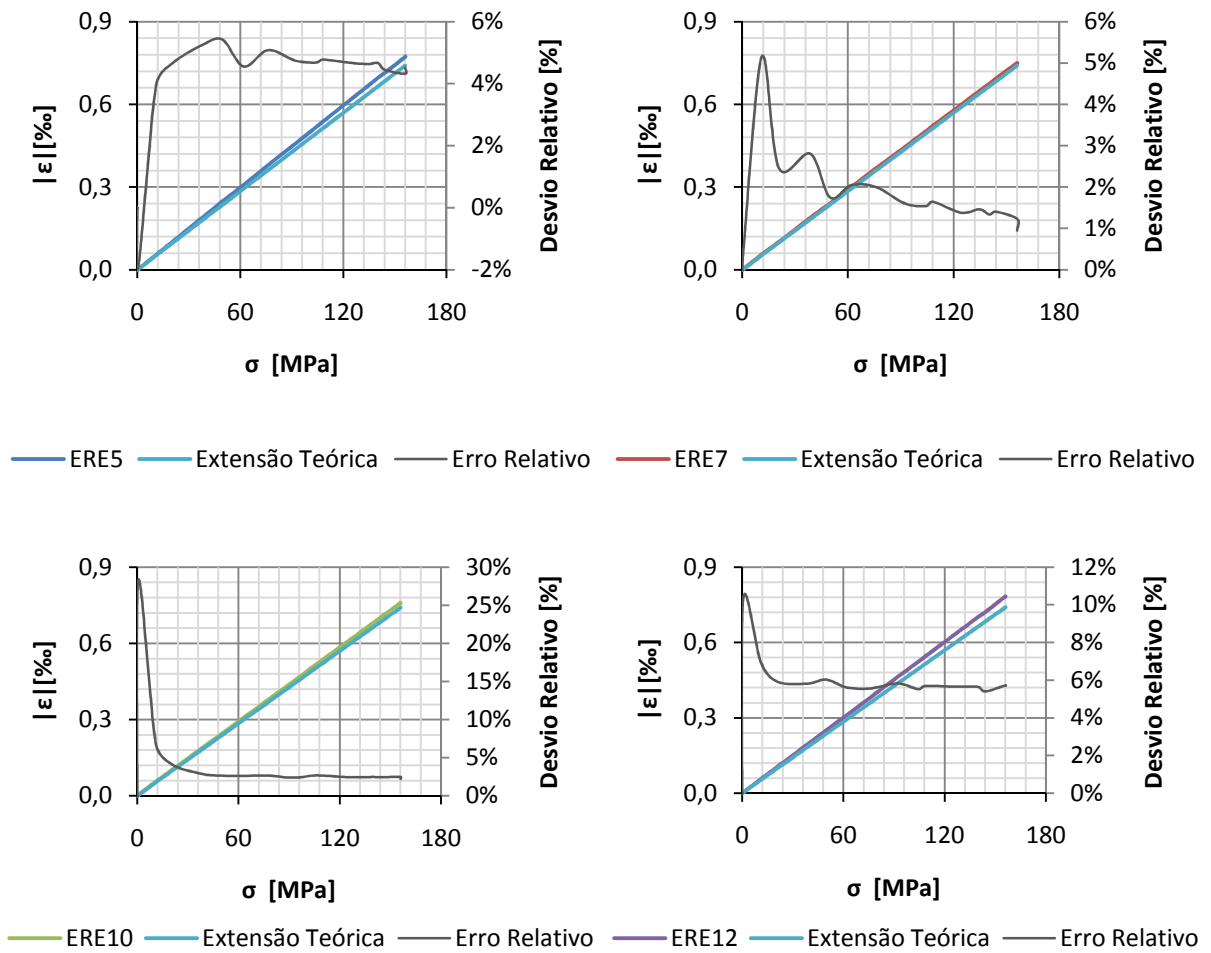


Fig. A.4 – Estudo do 2º Carregamento, Secção S2.

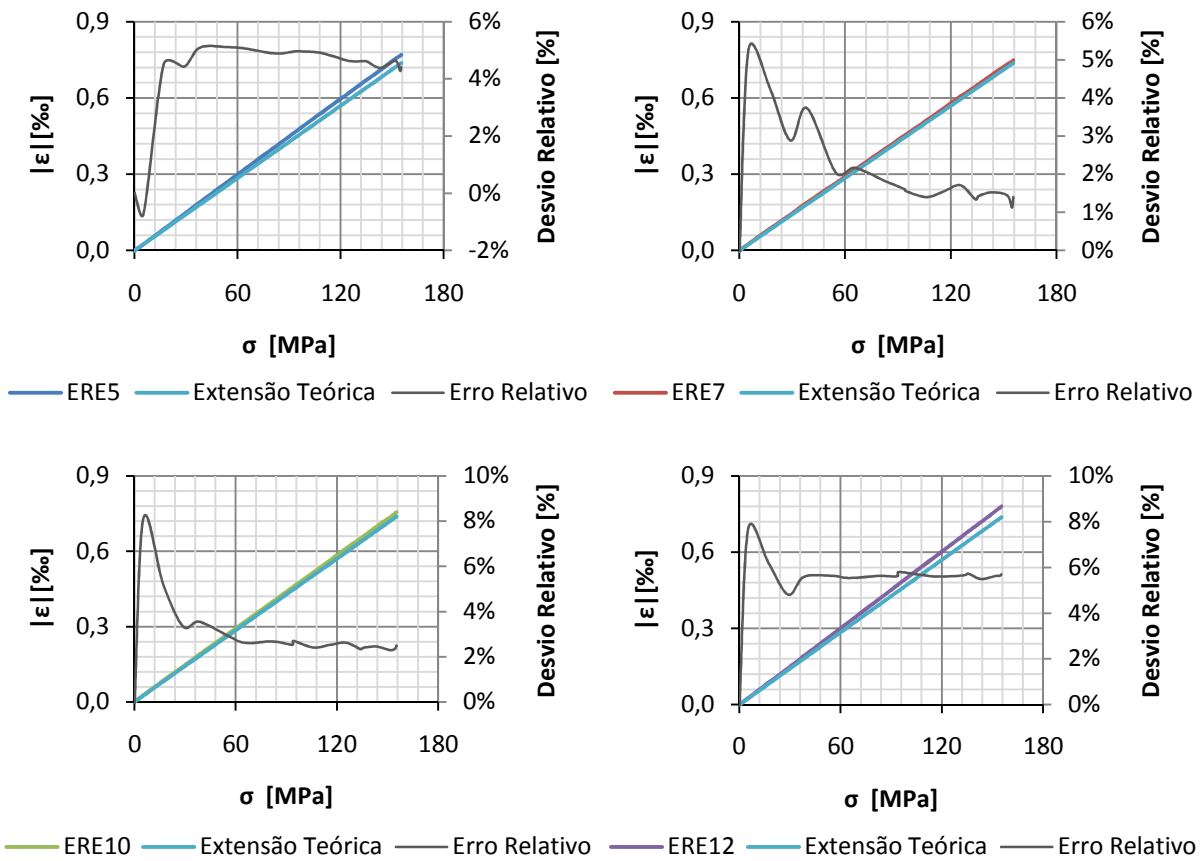


Fig. A.5 – Estudo do 3º Carregamento, Secção S2.

No Quadro A.1, apresenta-se o resumo dos valores de módulo de *Young* determinado com base nos resultados dos três carregamentos nos extensómetros ERE5, ERE7, ERE10 e ERE12. Nesta secção o módulo de elasticidade final obtido foi de 203,69GPa, o que implica uma redução do valor inicialmente estimado da ordem dos 3,3%.

Quadro A.1 – Resumo dos módulos de elasticidade, Secção S2.

| Sensor | Carregamento    | E [GPa] | $\bar{E}$ [GPa] |
|--------|-----------------|---------|-----------------|
|        | 1º Carregamento | 201,46  |                 |
| ERE5   | 2º Carregamento | 201,59  | 201,52          |
|        | 3º Carregamento | 201,52  |                 |
|        | 1º Carregamento | 208,06  |                 |
| ERE7   | 2º Carregamento | 207,88  | 207,90          |
|        | 3º Carregamento | 207,77  |                 |
|        | 1º Carregamento | 206,00  |                 |
| ERE10  | 2º Carregamento | 205,74  | 205,85          |
|        | 3º Carregamento | 205,80  |                 |
|        | 1º Carregamento | 199,42  |                 |
| ERE12  | 2º Carregamento | 199,51  | 199,49          |
|        | 3º Carregamento | 199,54  |                 |

### Secção S3

Do estudo dos três carregamentos conclui-se que na secção S3 os erros relativos associados aos sensores ERE8 e ERE13 são os mais significativos, apresentando valores da ordem dos 4% e 3%, respectivamente (ver Fig. A.6, Fig. A.7 e Fig. A.8).

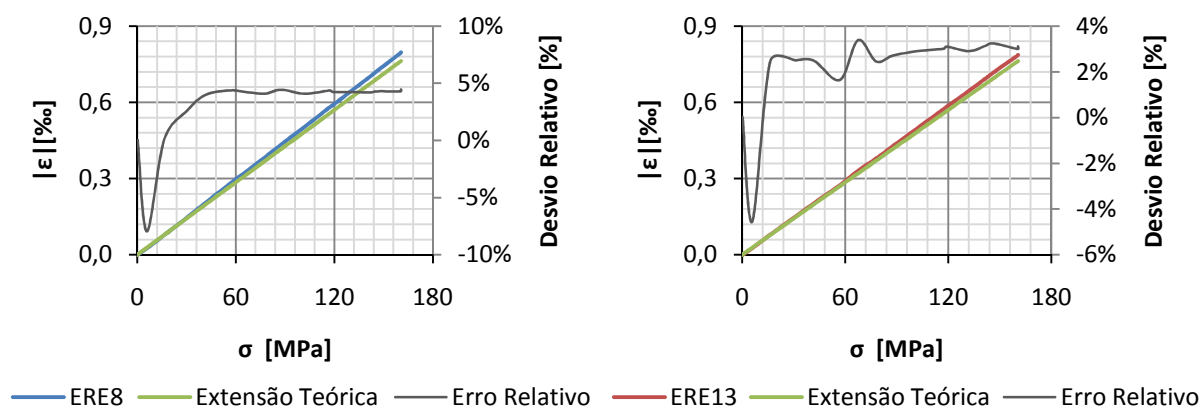


Fig. A.6 – Estudo do 1º Carregamento, Secção S3.

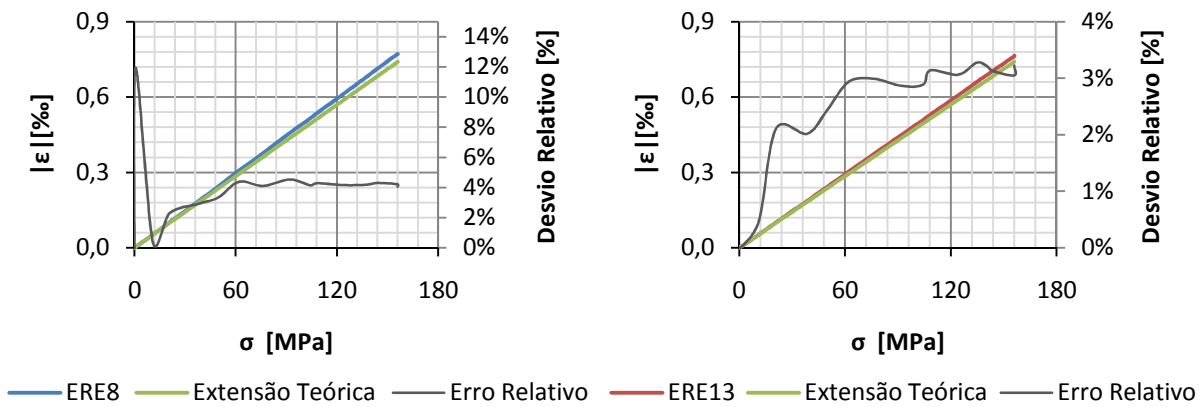


Fig. A.7 – Estudo do 2º Carregamento, Secção S3.

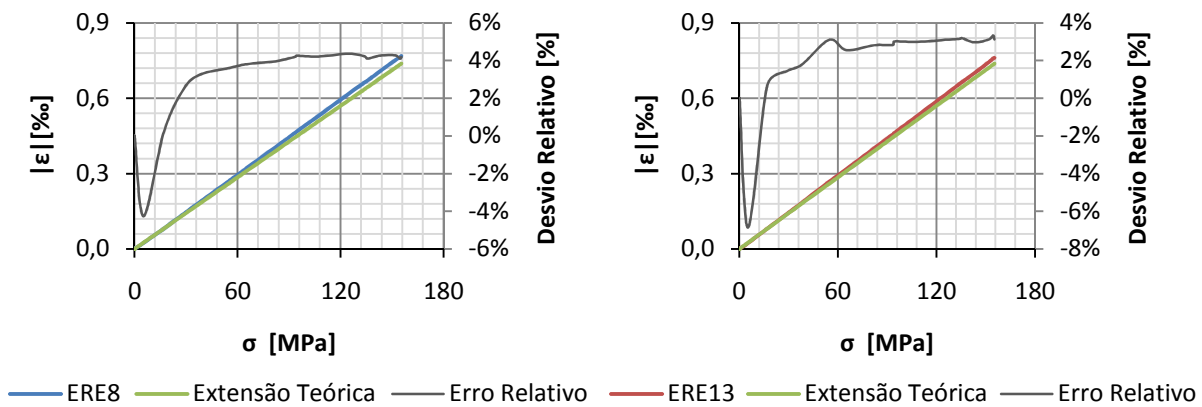


Fig. A.8 – Estudo do 3º Carregamento, Secção S3.

Na Quadro A.2, apresenta-se o resumo dos valores de módulo de *Young* determinado com base nos resultados dos três carregamentos nos extensómetros ERE8 e ERE13. Nesta secção o módulo de elasticidade final obtido foi de 203,14GPa, o que implica uma redução do valor inicialmente estimado da ordem dos 3,6%.

Quadro A.2 – Resumo dos módulos de elasticidade, Secção S3.

| Sensor | Carregamento    | E [GPa] | $\bar{E}$ [GPa] |
|--------|-----------------|---------|-----------------|
|        | 1º Carregamento | 202,01  |                 |
| ERE8   | 2º Carregamento | 202,27  | 202,17          |
|        | 3º Carregamento | 202,24  |                 |
|        | 1º Carregamento | 204,17  |                 |
| ERE13  | 2º Carregamento | 204,08  | 204,11          |
|        | 3º Carregamento | 204,07  |                 |

### A.2. ENSAIO ESTÁTICO 3

Apresentam-se de seguida as medições realizadas nas secções S2 e S3, à semelhança do que foi realizado no Capítulo 4 para a Secção S1.

#### Secção S2

Na Fig. A.9, observam-se os valores obtidos.

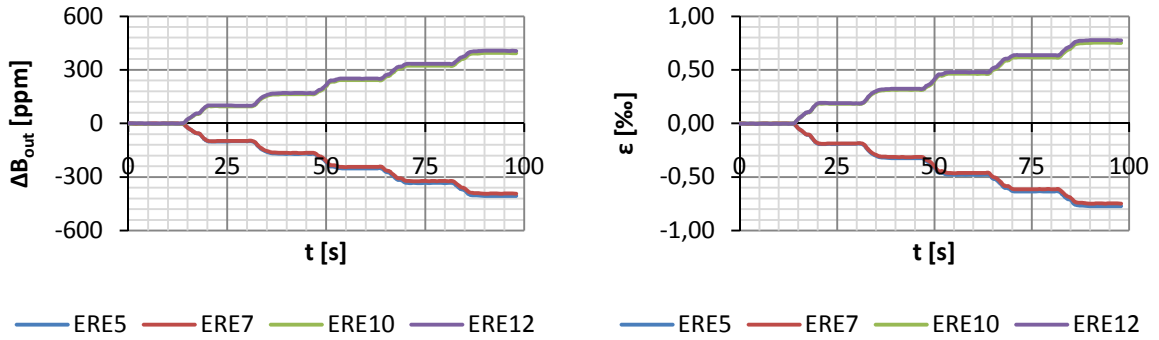


Fig. A.9 – Medições com extensómetros eléctricos, Secção S2.

#### Secção S3

A Fig. A.10 contém os dados adquiridos dos sensores ERE8 e ERE13, bem como a sua conversão para extensão.

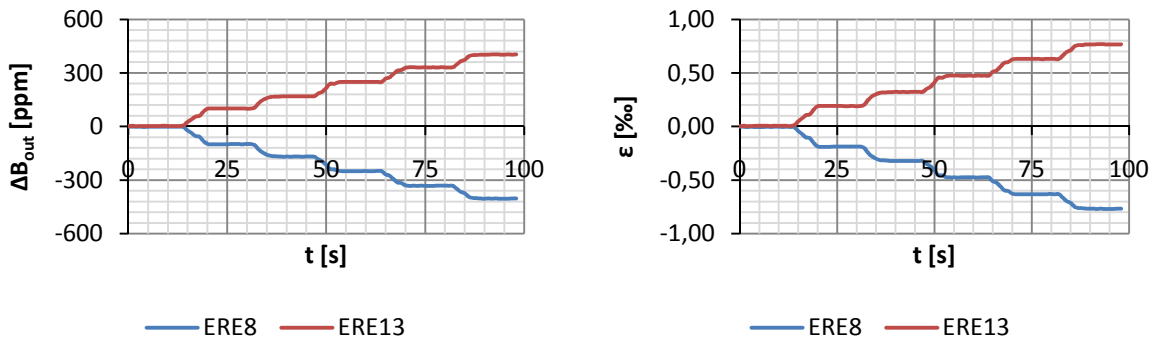


Fig. A.10 – Medições com extensómetros eléctricos, Secção S3.

Dado o ensaio em questão ser um ensaio por patamares, importa estudar os dados recebidos no sistema de aquisição nos intervalos de tempo em que se procurou que o nível de tensão instalada na estrutura permanecesse constante, o que resulta num total de dez análises igualmente repartidas pelas secções S2 e S3.

Secção S2

Nas Fig. A.11, Fig. A.12 e Fig. A.13, apresentam-se os diferentes valores de extensões medidos nos sensores ERE5, ERE7, ERE10 e ERE12 e o desvio destes em relação aos obtidos pela Lei de Hooke.

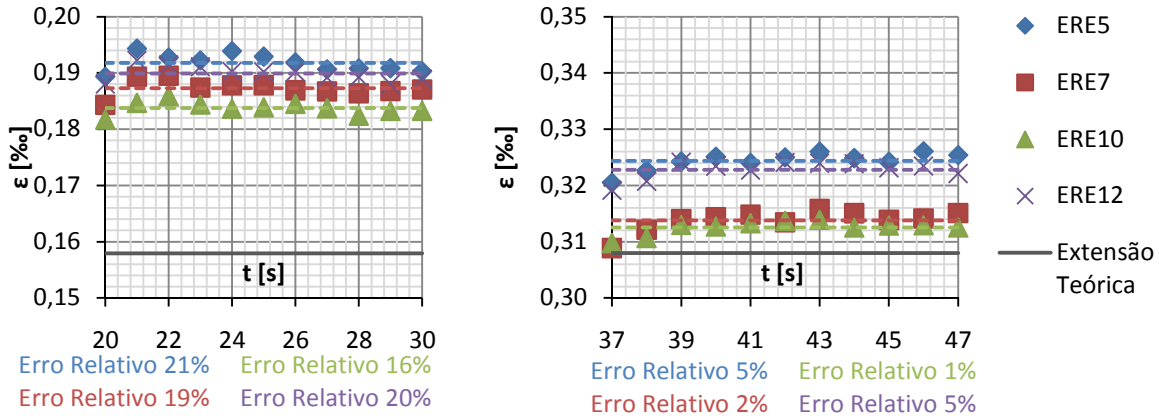


Fig. A.11 – Estudo do patamar de 10kN e 20kN, Secção S2.

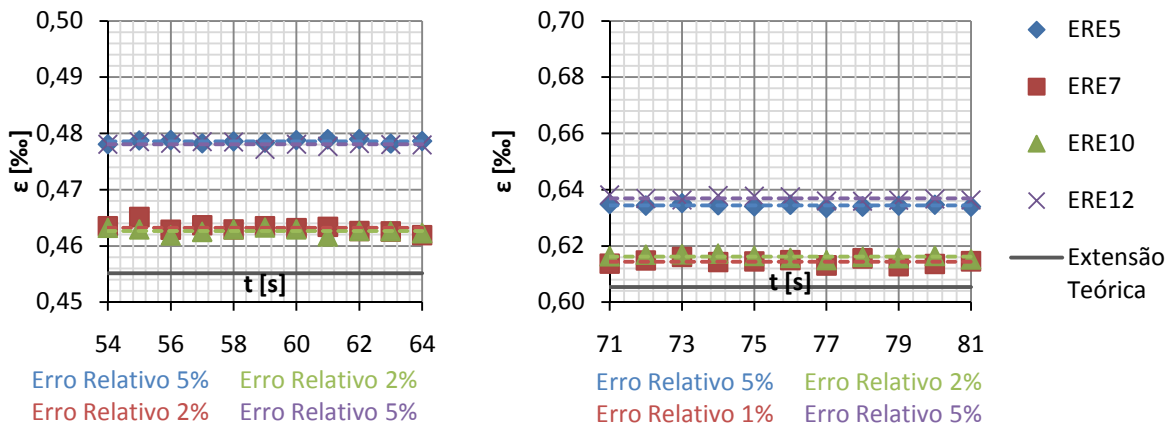


Fig. A.12 – Estudo do patamar de 30kN e 40kN, Secção S2.

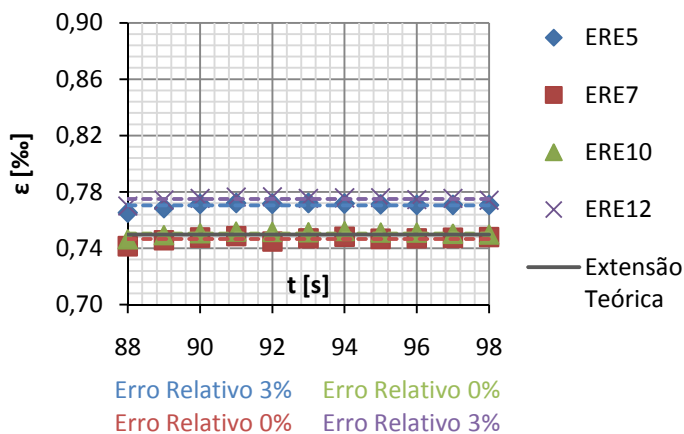


Fig. A.13 – Estudo do patamar de 50kN, Secção S2.

Uma vez mais o erro é bastante superior para níveis de carga mais baixos, conforme foi já exposto noutras análises desta dissertação, o que implica que os valores relativos ao primeiro patamar podem

ser de certa forma desprezados. Considera-se então que o intervalo em que o erro relativo se situa tem como mínimo 0% e máximo 5%. Conhecido o valor de força aplicado à estrutura por patamar e consequentemente o nível de  $\sigma$ , este último pode ser relacionado com o valor médio de extensões obtido para cada nível de carga, Quadro A.3.

Quadro A.3 – Extensões medidas por patamar e sensor, Secção S2.

| Patamar | $F_{\text{real}}$ [kN] | $\sigma$ [MPa] | Sensor | $\bar{\epsilon}$ [‰] |
|---------|------------------------|----------------|--------|----------------------|
| 10kN    | 10,43                  | 33,27          | ERE5   | 0,192                |
|         |                        |                | ERE7   | 0,187                |
|         |                        |                | ERE10  | 0,184                |
|         |                        |                | ERE12  | 0,190                |
| 20kN    | 20,33                  | 64,89          | ERE5   | 0,324                |
|         |                        |                | ERE7   | 0,314                |
|         |                        |                | ERE10  | 0,313                |
|         |                        |                | ERE12  | 0,323                |
| 30kN    | 30,05                  | 95,89          | ERE5   | 0,479                |
|         |                        |                | ERE7   | 0,463                |
|         |                        |                | ERE10  | 0,463                |
|         |                        |                | ERE12  | 0,478                |
| 40kN    | 39,97                  | 127,55         | ERE5   | 0,634                |
|         |                        |                | ERE7   | 0,614                |
|         |                        |                | ERE10  | 0,616                |
|         |                        |                | ERE12  | 0,637                |
| 50kN    | 49,50                  | 157,98         | ERE5   | 0,771                |
|         |                        |                | ERE7   | 0,747                |
|         |                        |                | ERE10  | 0,751                |
|         |                        |                | ERE12  | 0,775                |

Da análise do Quadro A.3, poderia pensar-se que os extensómetros ERE5 e ERE12 e os extensómetros ERE7 e ERE10 estariam colocados no mesmo banzo pela semelhança de valores que apresentam, uma vez que teoricamente a distribuição de tensões normais nestes é constante. Por exemplo, para um nível de carga de 30kN o primeiro par de sensores apresenta uma extensão média de 0,479‰, enquanto o segundo 0,463‰, contudo na realidade estes extensómetros encontram-se em banzos e abas diferentes. Uma possível explicação para este cenário é a eventual inclinação do eixo neutro da viga, o qual não seria perfeitamente paralelo aos banzos, Fig. A.14. Este pormenor pode dever-se à viga não estar perfeitamente assente nos apoios ou a eventuais efeitos de torção causados por má centragem da carga na estrutura.

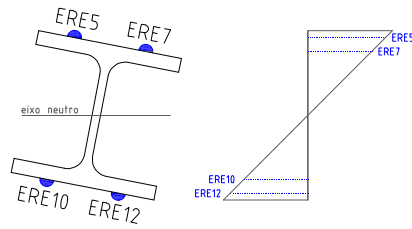


Fig. A.14 – Distribuição de extensões, Secção S2.

Por fim, aproxima-se um comportamento linear da estrutura e determina-se o valor do módulo de elasticidade na Fig. A.15. Conclui-se que este é 214,80GPa.

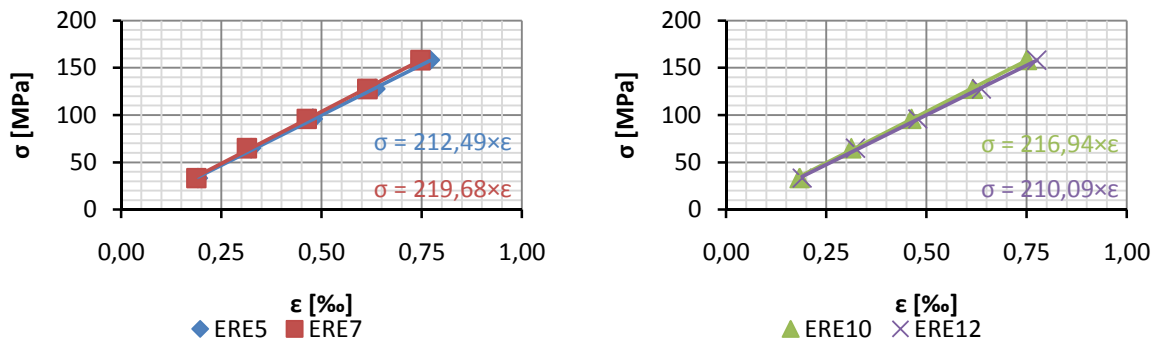


Fig. A.15 – Comportamento linear aproximado, Secção S2.

### Secção S3

Nas Fig. A.16, Fig. A.17 e Fig. A.18, apresentam-se os diferentes valores de extensões medidos nos sensores ERE5, ERE7, ERE10 e ERE12 e o desvio destes em relação aos valores obtidos pela Lei de Hooke.

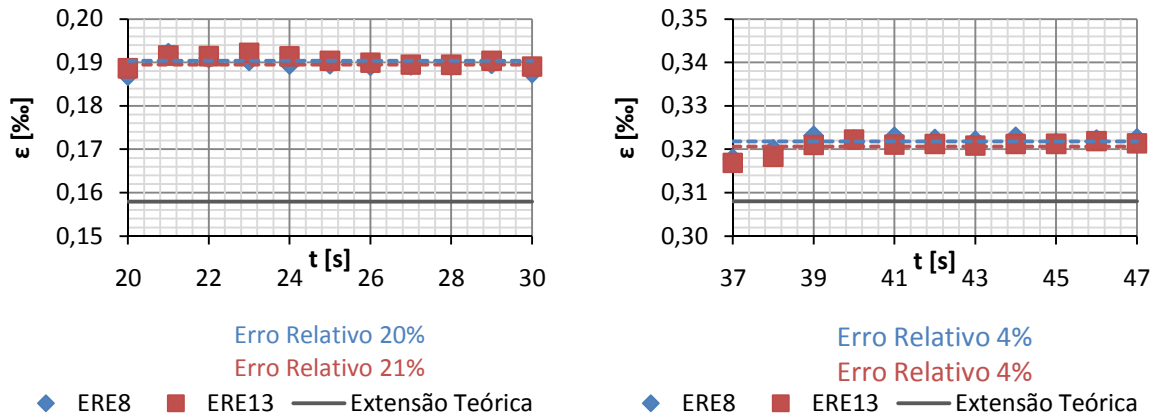


Fig. A.16 – Estudo dos patamares de 10kN e 20kN, Secção S3.

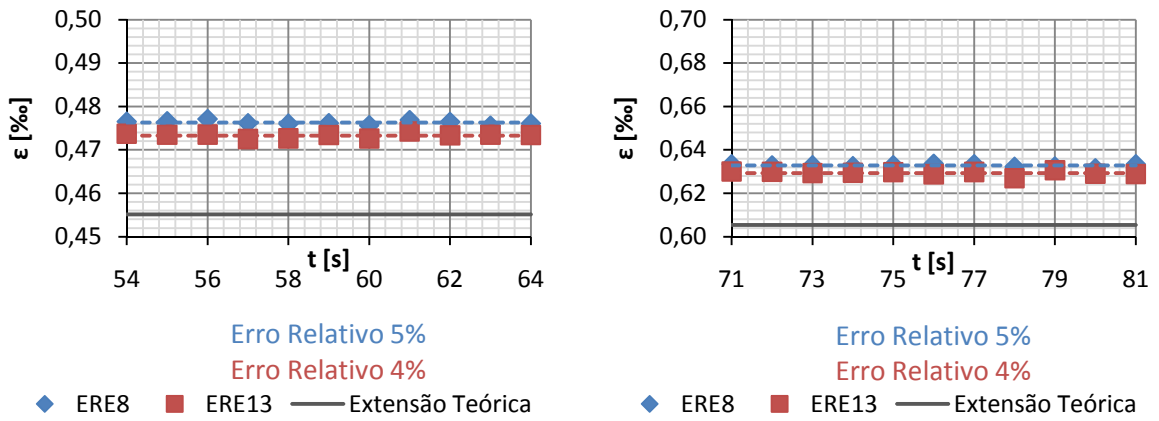


Fig. A.17 – Estudo dos patamares de 30kN e 40kN, Secção S3.

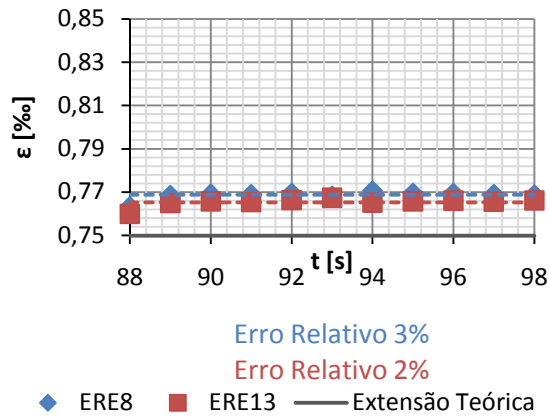


Fig. A.18 – Estudo do patamar de 50kN, Secção S3.

Novamente o erro obtido é inversamente proporcional ao nível de carga aplicado, uma vez que para 10kN este é aproximadamente 20% e para 50kN o desvio obtido foi de 2% a 3%.

O Quadro A.4, contém o valor de extensão média por patamar, bem como o valor de tensão aplicada. Estes valores serão depois utilizados na aproximação do comportamento da estrutura a uma resposta linear, Fig. A.19.

Quadro A.4 – Extensões medidas por patamar e sensor, Secção S3.

| Patamar | $F_{real}$ [kN] | $\sigma$ [MPa] | Sensor | $\bar{\epsilon}$ [‰] |
|---------|-----------------|----------------|--------|----------------------|
| 10kN    | 10,43           | 33,27          | ERE8   | 0,189                |
|         |                 |                | ERE13  | 0,190                |
| 20kN    | 20,33           | 64,89          | ERE8   | 0,322                |
|         |                 |                | ERE13  | 0,321                |
| 30kN    | 30,05           | 95,89          | ERE8   | 0,476                |
|         |                 |                | ERE13  | 0,473                |
| 40kN    | 39,97           | 127,55         | ERE8   | 0,633                |
|         |                 |                | ERE13  | 0,629                |
| 50kN    | 49,50           | 157,98         | ERE8   | 0,769                |
|         |                 |                | ERE13  | 0,765                |

O valor final de módulo de *Young* para a secção S3 é 212,97GPa, tendo sido calculado como a média das relações entre tensão/extensão apresentadas na Fig. A.19.

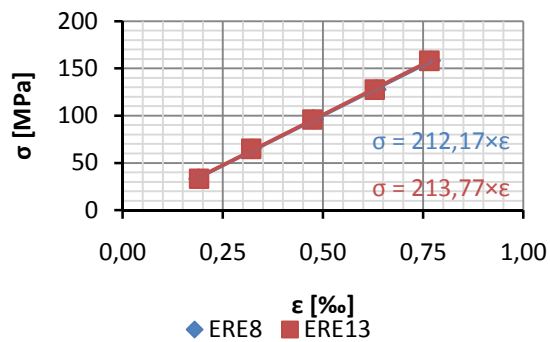


Fig. A.19 – Comportamento linear aproximado, Secção S3.

### A.3. ENSAIO ESTÁTICO 4

Uma vez mais a transformação do sinal de saída dos extensómetros ligados em circuito tipo ponte de *Wheatstone* em *microstrain* é realizada recorrendo à expressão (3.1).

#### Secção S2

Os resultados da medição da variação desse sinal de saída e da correspondência respectiva estão presentes na Fig. A.20, sendo que nesta se representam os sensores ERE5, a azul, ERE7, a vermelho, ERE10, a verde, e ERE12, a roxo.

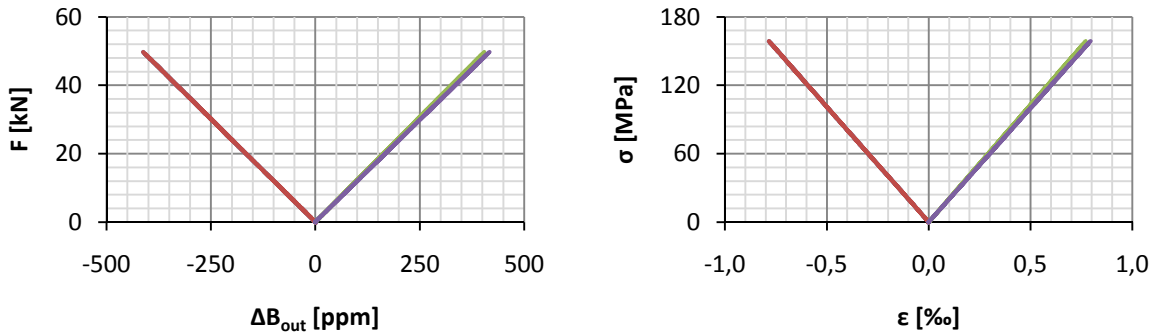


Fig. A.20 – Medições com extensómetros eléctricos, Secção S2.

#### Secção S3

Na Fig. A.21, encontram-se representados o sinal de saída dos sensores ERE8 e ERE13 a azul e vermelho respectivamente, bem como a conversão destes para extensão.

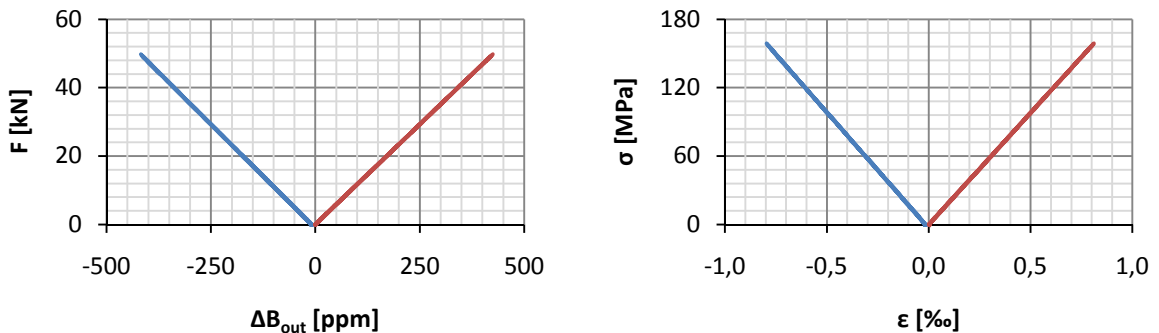


Fig. A.21 – Medições com extensómetros eléctricos, Secção S3.

Adoptando a metodologia já aplicada noutras análises de extensões obtidas no sistema de aquisição, o estudo das deformações axiais neste ensaio iniciou-se pela comparação destas com os valores teóricos obtidos pela Lei de *Hooke* – ver Fig. A.22, Fig. A.23 e Fig. A.24 para análise da Secção S2 e Fig. A.25, Fig. A.26 e Fig. A.27 para estudo da Secção S3.

Secção S2

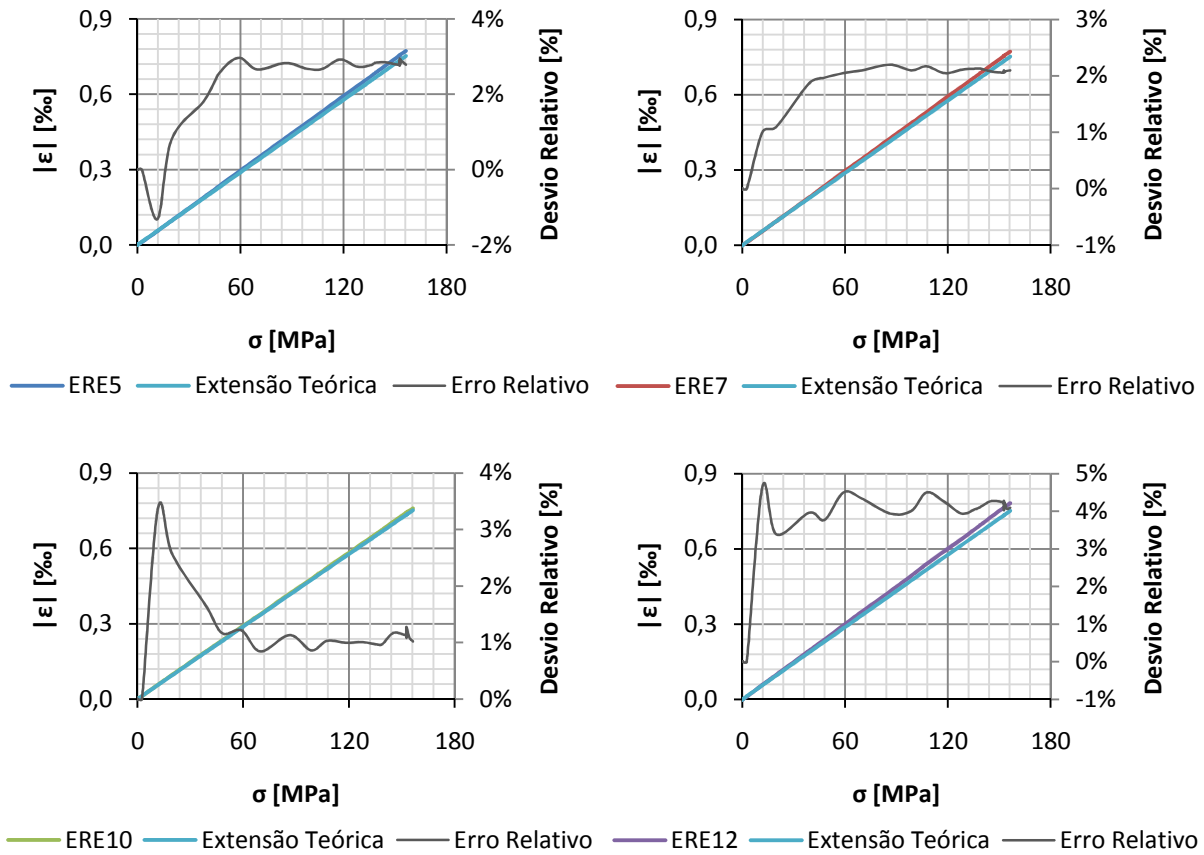


Fig. A.22 – Estudo do 1º Carregamento, Secção S2.

Para o primeiro carregamento, os extensómetros localizados na secção S2 apresentam resultados satisfatórios uma vez que o erro destes varia entre um ponto percentual, no caso do sensor ERE10, e 4,5% no sensor ERE12. Os sensores ERE5 e ERE7 apresentam um erro dos 2% aos 3%.

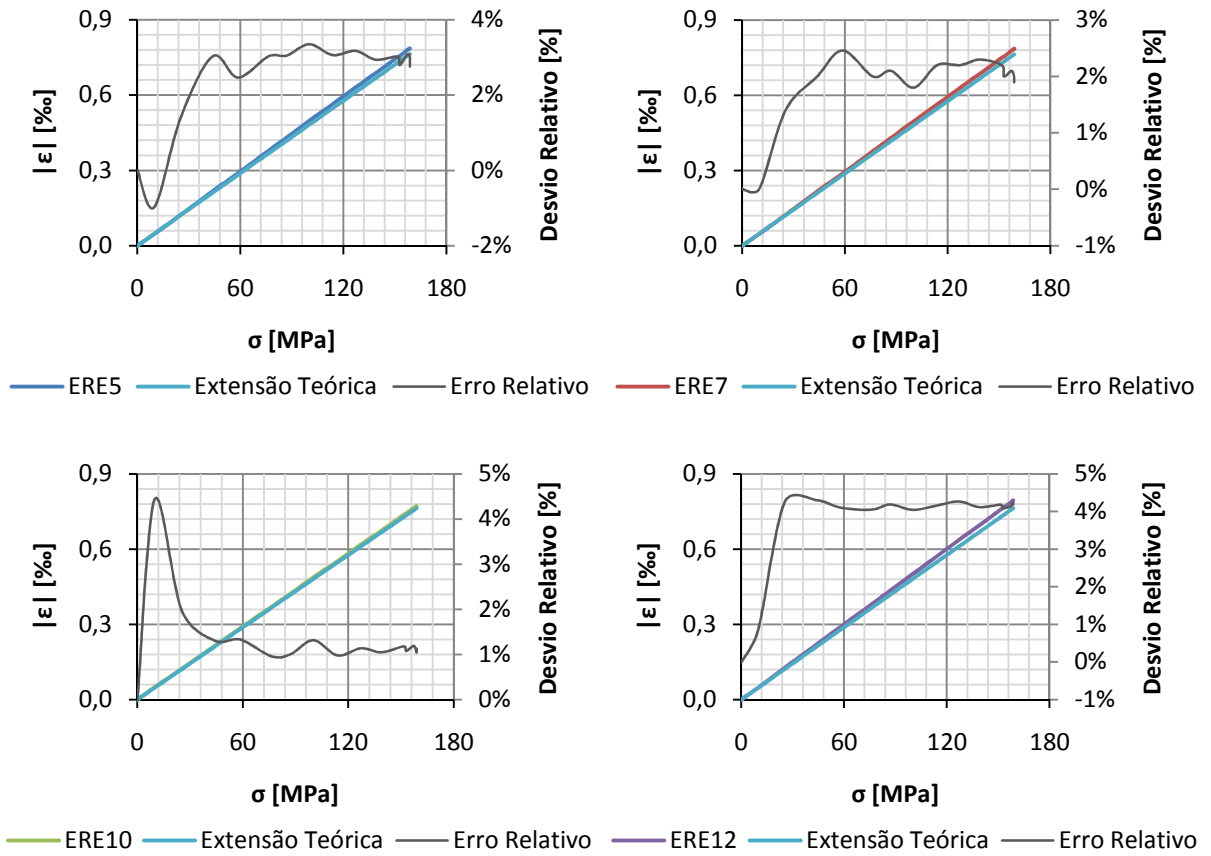


Fig. A.23 – Estudo do 2º Carregamento, Secção S2.

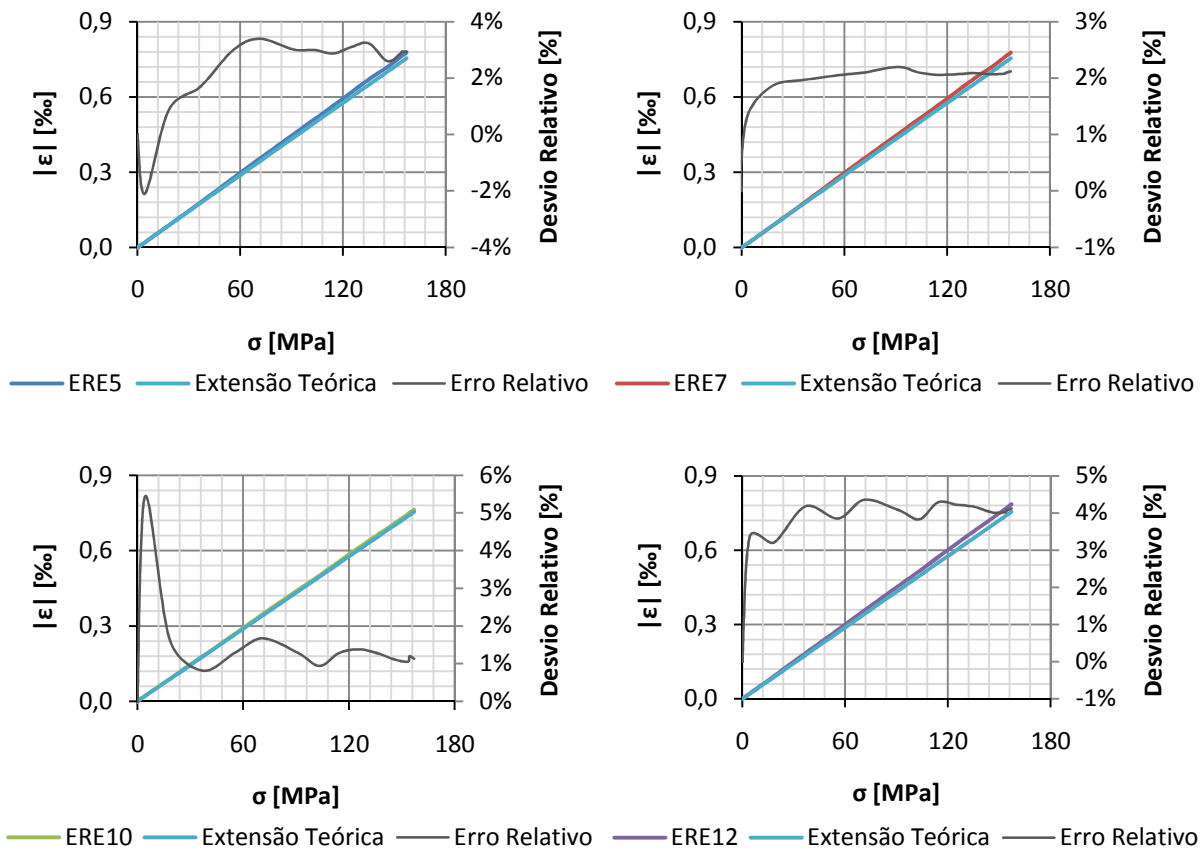


Fig. A.24 – Estudo do 3º Carregamento, Secção S2.

O cenário comentado no primeiro carregamento repete-se para o segundo e terceiro ciclo de carga, onde o extensómetro com desvio relativo mais baixo é o ERE10 (1%) sendo o ERE12 o sensor com maior erro (4%). Os restantes apresentam valores intermédios de 2% a 3%.

Secção S3

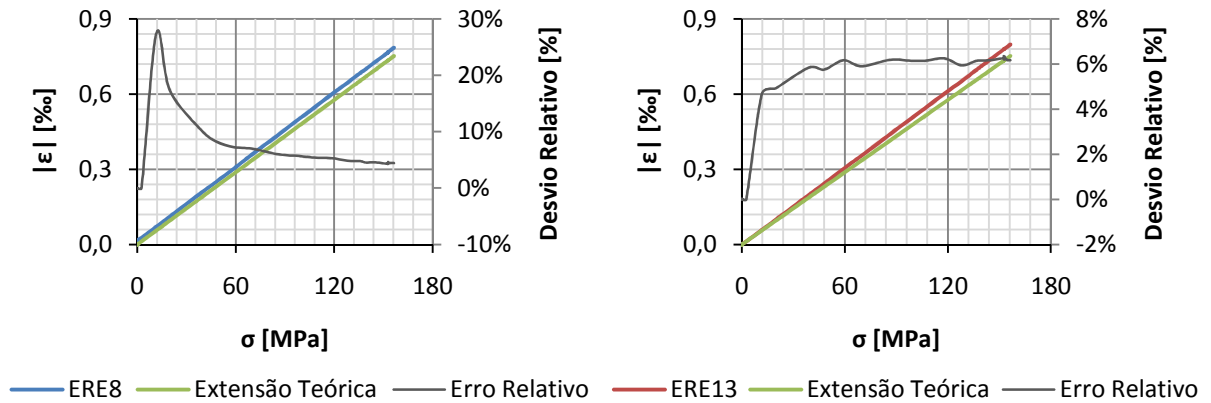


Fig. A.25 – Estudo do 1º Carregamento, Secção S3.

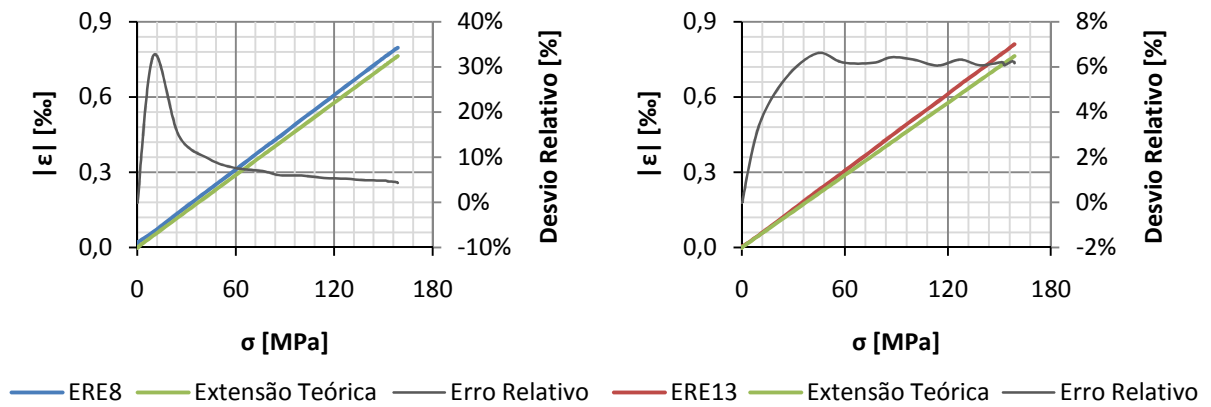


Fig. A.26 – Estudo do 2º Carregamento, Secção S3.

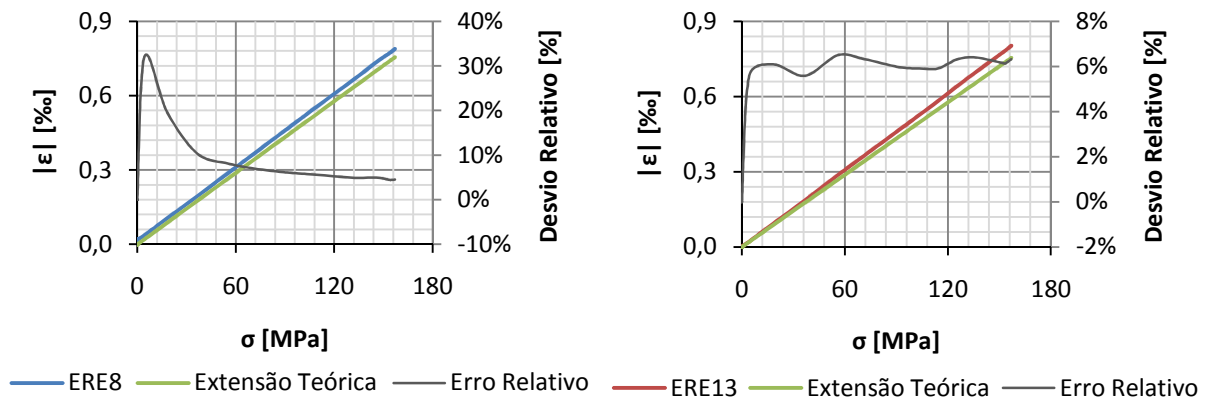


Fig. A.27 – Estudo do 3º Carregamento, Secção S3.

Relativamente à secção S3 verifica-se que o sensor ERE8 apresenta um elevado erro no início o qual tende ao longo do carregamento para o mesmo valor de desvio do sensor ERE13. Esta diferença de comportamento inicial dos dois sensores pode dever-se ao facto de terem sido colados com técnicas diferentes e daí exibirem comportamentos diferentes em fases de pré-carga.

#### A.4. ENSAIO ESTÁTICO 5

À semelhança do que tem vindo a ser realizado a relação entre o sinal de saída dos extensómetros ligados em circuito tipo ponte de *Wheatstone* e extensões é conseguida recorrendo à expressão (3.1).

##### Secção S2

Os resultados da medição da variação desse sinal de saída e da correspondência respectiva estão presentes na Fig. A.28, sendo que nesta se representam os sensores ERE5, a azul, ERE7, a vermelho, ERE10, a verde, e ERE12, a roxo.

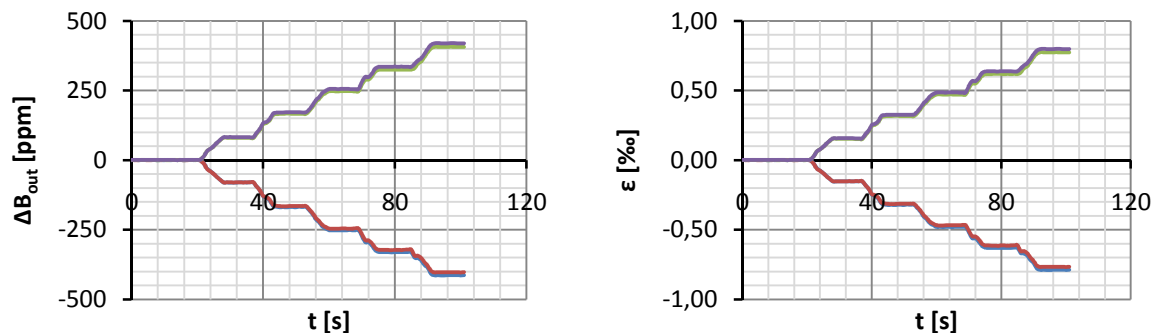


Fig. A.28 – Medições com extensómetros eléctricos, Secção S2.

##### Secção S3

Relativamente à informação obtida da rede de sensores instalada na secção S3, esta encontra-se representada na Fig. A.29, em que as curvas a azul dizem respeito ao sensor ERE8 e as vermelhas ao sensor ERE13.

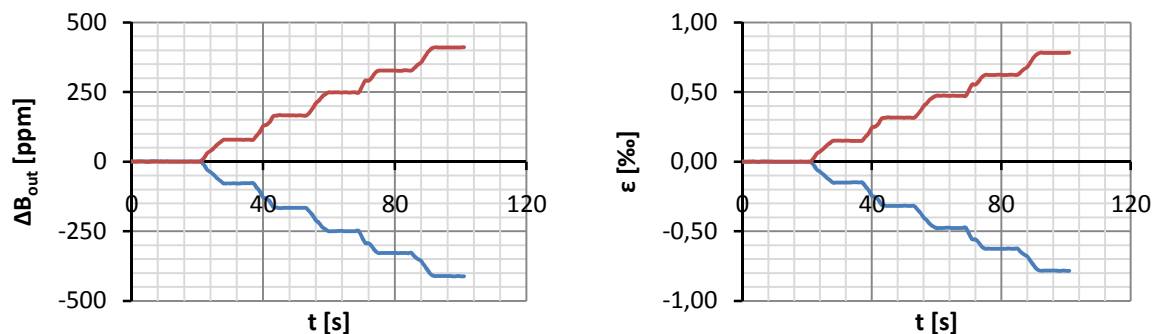


Fig. A.29 – Medições com extensómetros eléctricos, Secção S3.

Dado o ensaio em questão ser um ensaio por patamares, estudam-se os dados recebidos no sistema de aquisição nos intervalos de tempo em que se manteve o nível de tensão instalada na estrutura constante, o que resulta num total de dez análises igualmente repartidas pelas secções S2 e S3.

##### Secção S2

Nas Fig. A.30, Fig. A.31 e Fig. A.32, apresentam-se os diferentes valores de extensões medidos nos sensores ERE5, ERE7, ERE10 e ERE12 e o desvio destes em relação aos valores obtidos pela Lei de *Hooke*.

De acordo com a informação exposta conclui-se que o desvio relativo entre os valores lidos e os teóricos correspondem a um intervalo de 1% a 6%, sendo este devido ao facto do módulo de elasticidade do aço não ser uma propriedade cujo valor esteja perfeitamente e rigorosamente definido. De forma a sintetizar a informação apresentada nas figuras anteriores, apresenta-se o Quadro A.5 o qual contém os valores médios de extensão obtidos nos diversos patamares para a secção S2, bem como os de extensão para cargas exactas de 10kN, 20kN, 30kN, 40kN e 50kN,  $\bar{\epsilon}_x$ .

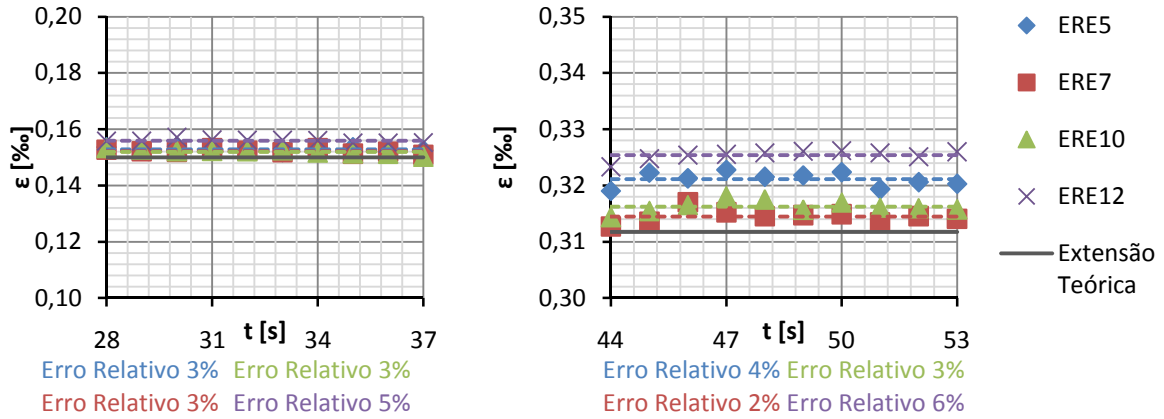


Fig. A.30 – Estudo do patamar de 10kN e 20kN, Secção S2.

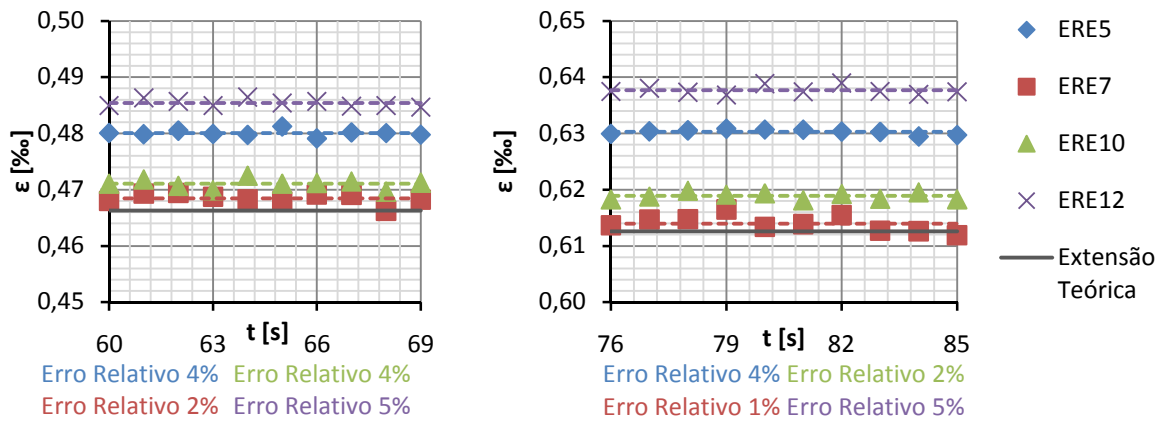


Fig. A.31 – Estudo do patamar de 30kN e 40kN, Secção S2.

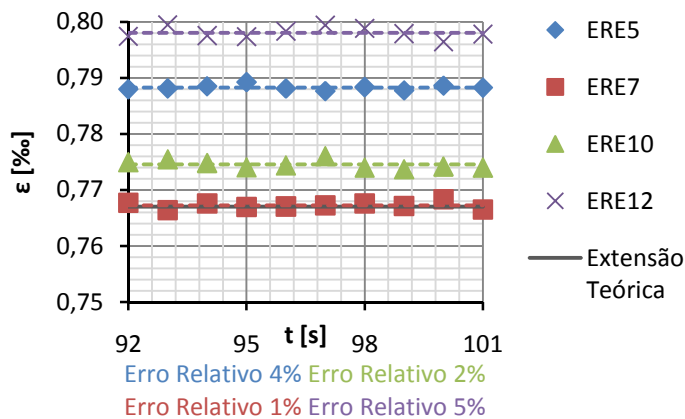


Fig. A.32 – Estudo do patamar de 50kN, Secção S2.

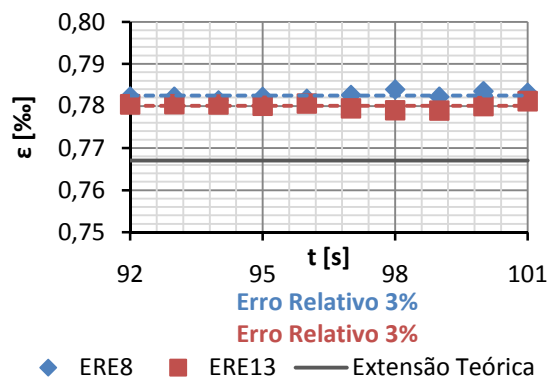
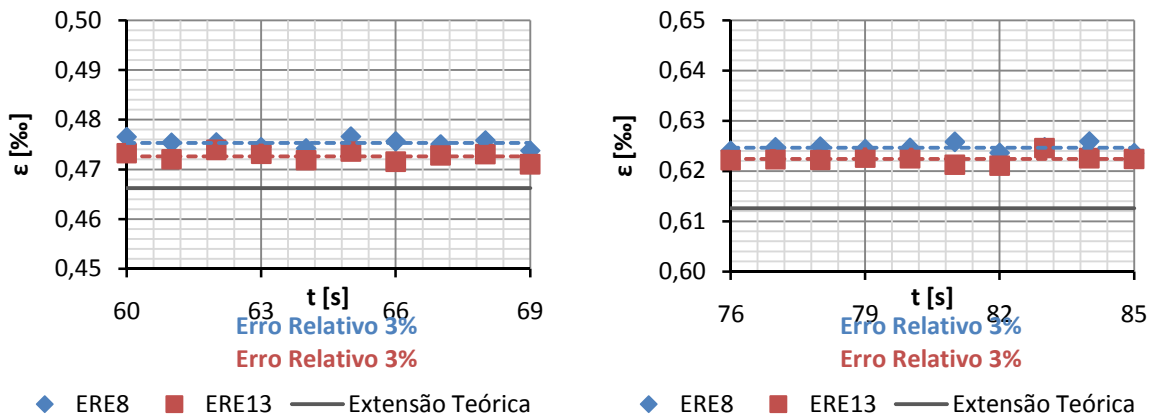
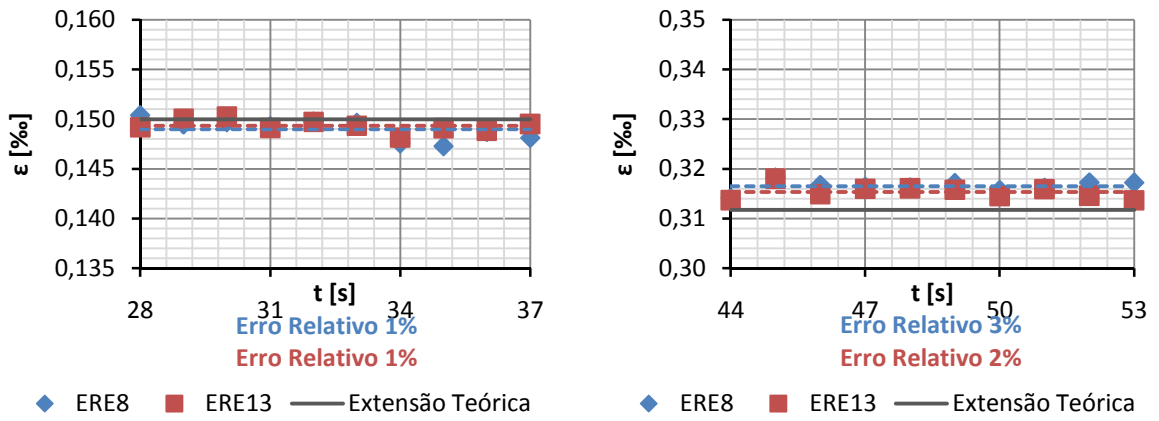
Quadro A.5 – Extensões medidas por patamar e sensor, Secção S2.

| Patamar | $F_{\text{real}}$ [kN] | Sensor | $\bar{\varepsilon}$ [‰] | $\bar{\varepsilon}_{50}$ [‰] |
|---------|------------------------|--------|-------------------------|------------------------------|
| 10kN    | 9,78                   | ERE5   | 0,153                   | 0,156                        |
|         |                        | ERE7   | 0,152                   | 0,156                        |
|         |                        | ERE10  | 0,152                   | 0,155                        |
|         |                        | ERE12  | 0,156                   | 0,159                        |
| 20kN    | 20,33                  | ERE5   | 0,321                   | 0,316                        |
|         |                        | ERE7   | 0,314                   | 0,309                        |
|         |                        | ERE10  | 0,316                   | 0,311                        |
|         |                        | ERE12  | 0,325                   | 0,320                        |
| 30kN    | 30,41                  | ERE5   | 0,480                   | 0,474                        |
|         |                        | ERE7   | 0,468                   | 0,462                        |
|         |                        | ERE10  | 0,471                   | 0,465                        |
|         |                        | ERE12  | 0,485                   | 0,479                        |
| 40kN    | 39,96                  | ERE5   | 0,630                   | 0,631                        |
|         |                        | ERE7   | 0,614                   | 0,615                        |
|         |                        | ERE10  | 0,619                   | 0,620                        |
|         |                        | ERE12  | 0,638                   | 0,638                        |
| 50kN    | 50,03                  | ERE5   | 0,788                   | 0,788                        |
|         |                        | ERE7   | 0,767                   | 0,767                        |
|         |                        | ERE10  | 0,775                   | 0,774                        |
|         |                        | ERE12  | 0,798                   | 0,798                        |

### Secção S3

Adoptando a mesma metodologia nas Fig. A.33, Fig. A.34 e Fig. A.35 apresentam-se os diferentes valores de extensões medidos nos sensores ERE8 e ERE13, bem como o erro relativo destes.

Nesta secção o desvio relativo varia de 1% a 3%, valores mais reduzidos do que os da secção anterior. De forma a resumir a informação, inclui-se o Quadro A.6 o qual contém os valores médios de extensão obtidos nos diversos patamares para a Secção S3 e os valores de extensão para cargas exactas de 10kN a 50kN,  $\bar{\varepsilon}_x$ .



Quadro A.6 – Extensões medidas por patamar e sensor, Secção S3.

| Patamar | $F_{\text{real}}$ [kN] | Sensor | $\bar{\varepsilon}$ [‰] | $\bar{\varepsilon}_x$ [‰] |
|---------|------------------------|--------|-------------------------|---------------------------|
| 10kN    | 9,78                   | ERE8   | 0,149                   | 0,152                     |
|         |                        | ERE13  | 0,149                   | 0,153                     |
| 20kN    | 20,33                  | ERE8   | 0,317                   | 0,311                     |
|         |                        | ERE13  | 0,315                   | 0,310                     |
| 30kN    | 30,41                  | ERE8   | 0,475                   | 0,469                     |
|         |                        | ERE13  | 0,473                   | 0,466                     |
| 40kN    | 39,96                  | ERE8   | 0,625                   | 0,625                     |
|         |                        | ERE13  | 0,622                   | 0,623                     |
| 50kN    | 50,03                  | ERE8   | 0,782                   | 0,782                     |
|         |                        | ERE13  | 0,780                   | 0,780                     |

# ANEXO B

## AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE ENSAIOS DINÂMICOS

### B.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Do ponto de vista do autor, é importante estudar o modo de funcionamento de sistemas de monitorização em ensaios dinâmicos, de modo a perceber o funcionamento de diferentes tipos de acelerómetros e o desempenho dos sistemas de aquisição normalmente utilizados nestes cenários.

De modo a aplicar impulsos sobre o perfil metálico, optou-se por suspender na Secção S4 num primeiro teste uma massa de 10kg e, num segundo ensaio, de 15kg. Ao ser libertada instantaneamente, a massa simula uma acção dinâmica capaz de excitar a estrutura e de por esta a vibrar.

A rede de sensores instalada no demonstrador laboratorial consistiu em dois acelerómetros do tipo piezoeléctrico e um acelerómetro do tipo MEMS. No Capítulo 2, abordou-se teoricamente cada um destes tipos de sensores, sendo então importante comparar o seu desempenho de um ponto de vista prático. Por outro lado, tentar-se-á experimentar um novo sistema de aquisição de sinal, o *CompactRIO* da *National Instruments*. Este é o principal objectivo deste anexo, uma vez que, até à data, não existe grande experiência na utilização destes sensores e do sistema de aquisição referido.

Face ao que foi exposto, optou-se por dividir o Anexo B em apenas dois pontos adicionais. O ponto B.2 apresenta os ensaios dinâmicos realizados, onde se discutem as características do sistema de aquisição e dos sensores instalados, e se expõem as medições feitas, bem como a análise destas. No ponto B.3 tecem-se breves conclusões, bem como se apresentam desenvolvimentos futuros a realizar, os quais, do ponto de vista do autor, melhorariam os resultados obtidos.

### B.2. ENSAIOS DINÂMICOS

#### B.2.1. PREPARAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Como solução de sistema de aquisição testaram-se em laboratório duas soluções da *National Instruments*. A primeira, o *CompactRio* (cRIO), é uma das suas mais recentes tecnologias, e desse facto resulta um menor conhecimento na sua aplicação. De facto realizaram-se vários testes com diferentes tipos de sensores para cada um dos módulos do cRIO, e a complexidade a nível de programação das diferentes cartas fez com que se optasse no final por utilizar o *CompactDAQ* (cDAQ).

Pese embora seja um sistema mais antigo, e conseqüentemente mais limitado do ponto de vista do aparelho em bruto, o cDAQ possui códigos e *software* próprio para leitura dos diferentes módulos. Estes permitem uma utilização consideravelmente mais fácil e rápida do equipamento, uma vez que o sistema de aquisição funciona unicamente como interface entre os diferentes módulos e o computador a que está ligado, não assumindo assim papel de controlador.

No que concerne à rede de sensores foram instalados dois sensores piezoelétricos, modelo 352B10, da PCB *Piezotronics* e um MEMS, modelo ADXL203, da *Analog Devices*. A principal diferença entre estes sensores é o modo de funcionamento dos mesmos. Enquanto os primeiros são acelerómetros piezoelétricos, os segundos são acelerómetros capacitivos do tipo *MicroElectroMechanical Systems*.

No que concerne a ambas as soluções de acelerómetros verificou-se também que os acelerómetros do tipo MEMS apresentam um alcance muito mais próximo daquele que é procurado para instrumentação de aplicações de engenharia civil, uma vez que a gama de leituras destes é de  $\pm 1,7g$ . Já o acelerómetro da PCB apresenta nas suas especificações técnicas uma gama de medição de  $\pm 500g$ . Tendo em consideração as sensibilidades apresentadas pelos fabricantes os acelerómetros da *Analog Devices* apresentam um desvio de  $\pm 0,025g$  a  $\pm 0,05g$ , enquanto os da PCB, com uma sensibilidade de  $\pm 10\%$ , podem apresentar um desvio de  $\pm 50g$ , valor que poderá comprometer os ensaios realizados.

A localização destes sensores foi já apresentada no Capítulo 2, contudo apresenta-se aqui a Fig. B.1 a qual representa o demonstrador laboratorial com os respectivos sensores instalados e o esquema de carga utilizado. Nesta AP1 e AP2 dizem respeito aos acelerómetros piezoelétricos 1 e 2, enquanto o sensor MEMS1 é o acelerómetro capacitivo do tipo MEMS de dois eixos de medida. Na Fig. B.2 apresenta-se uma foto das massas utilizadas para simular os impulsos sobre o perfil metálico.

Por último deve ser referido que no decorrer dos ensaios se instalou no sistema de monitorização um condicionador de sinal (Fig. B.3), de modo a conseguir aferir melhor sobre a resposta dos acelerómetros da PCB, pela questão anteriormente referida,

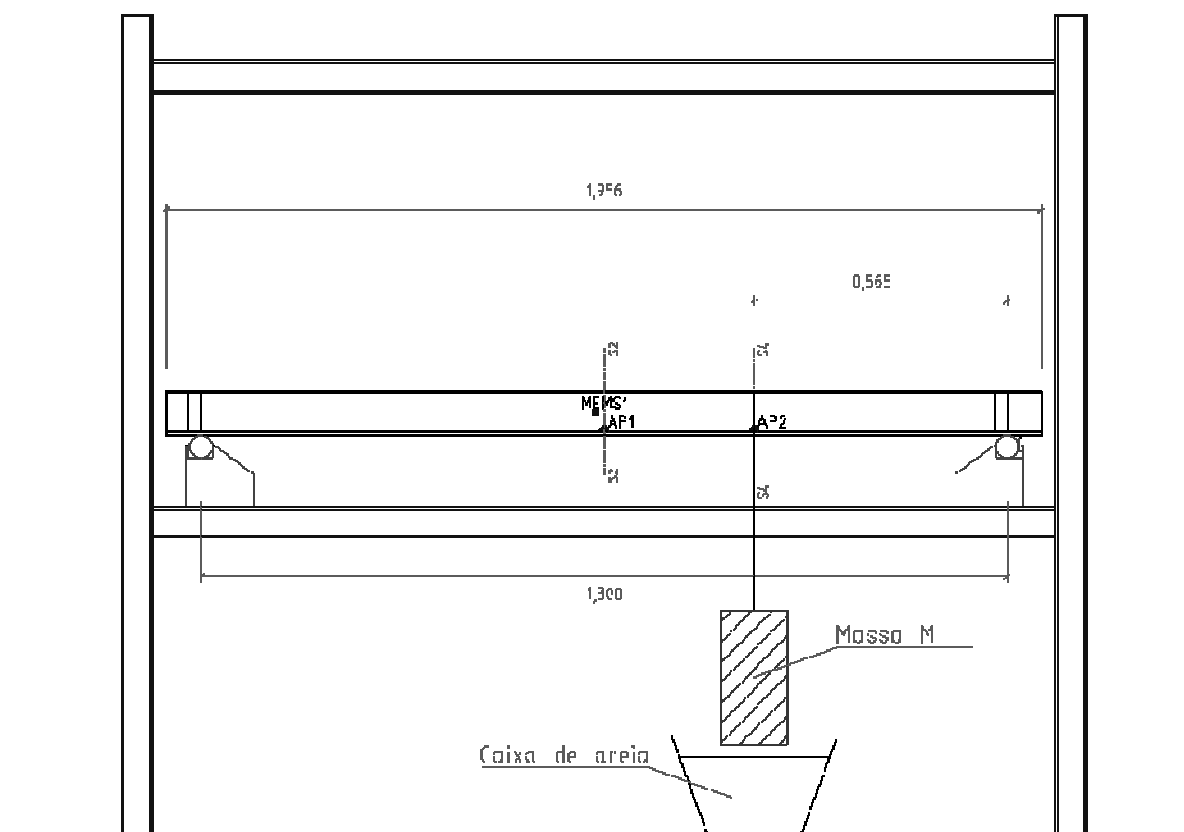


Fig. B.1 – Demonstrador laboratorial com rede de sensores e sistema de carga utilizado.



Fig. B.2 – Massas utilizadas em laboratório para simular impulsos (Foto do autor).



Fig. B.3 – Condicionador de sinal da PCB Piezotronics, modelo 480E09.

### B.2.2. MEDIÇÕES DE ACELERAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

No primeiro ensaio realizado o impulso aplicado sobre a viga correspondeu a utilização da massa de 10kg. Na Fig. B.4, representa-se os valores de acelerações obtidos para os acelerómetros piezoelétricos, enquanto a Fig. B.5 ilustra para a mesma massa a resposta lida nos sensor do tipo MEMS.

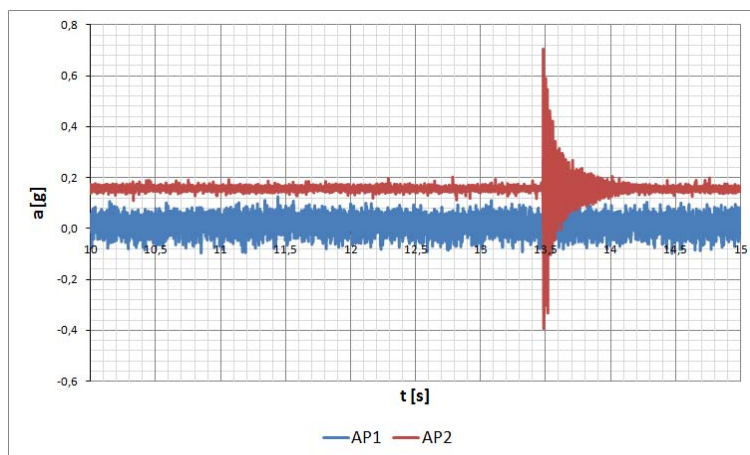


Fig. B.4 – Medições com acelerómetros AP1 e AP2 (M=10kg).

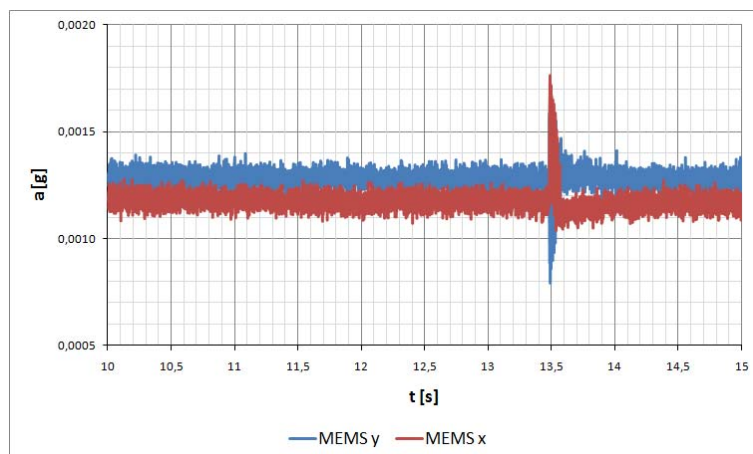


Fig. B.5 – Medições com acelerómetro MEMS (M=10kg).

Da análise das Fig. B.4 e Fig. B.5 podem-se retirar várias conclusões. A primeira diz respeito ao facto do acelerómetro AP1, localizado a meio vão, não ter registado qualquer variação de tensão com o impulso aplicado. Tal pode dever-se à situação enunciada anteriormente da gama de medição deste sensor ser muito elevada, o que, aliado à sua sensibilidade, se traduz em erros também elevados. Outro motivo que poderá estar na origem de não se ter obtido nenhum registo de aceleração nesta secção é a rigidez do perfil metálico, contudo, o sensor do tipo MEMS, localizado na mesma secção, registou variação de aceleração, o que vem contrariar esta teoria.

Outras constatações que se observam na Fig. B.4 são que, embora o acelerómetro AP1 apresente uma resposta amortecida ao impulso, o valor de aceleração em repouso é diferente de zero e os de acelerações máximas registadas são elevadíssimos,  $7\text{m/s}^2$  e  $-4\text{m/s}^2$ . Ora se se tiver em consideração que muitos regulamentos apresentam, por exemplo, valores limites de acelerações de  $0,5\text{m/s}^2$  em pontes pedonais, facilmente se compreende que para estruturas de engenharia civil os valores registados estão errados.

Por outro lado, os problemas verificados com o sensor do tipo MEMS são de outra natureza. De facto, estes exibem uma vibração diferente de zero quando teoricamente estão em repouso. Estes valores poderão dever-se à vibração ambiente sentida no laboratório devida a outros trabalhos que na altura decorriam em paralelo com os ensaios, os quais incutiam uma ligeira vibração no pórtico onde o perfil está instalado, e conseqüentemente, no próprio perfil. O problema deste acelerómetro reside na resposta obtida nas direcções x e y. Uma vez que o impulso aplicado provocou um deslocamento unicamente vertical na viga, direcção identificada como y no sensor em questão, seria de esperar que a componente x da aceleração medida no sensor MEMS1 não fosse alterada. Contudo, conforme a Fig. B.5 ilustra o sensor registou acelerações de sinais opostos nas direcções x e y, o que, do ponto de vista do autor, poderá apenas indicar que este não se encontra correctamente colado à alma do perfil, visto uma ligeira rotação do sensor provocar leituras de acelerações em ambos os eixos.

Seguidamente, apresenta-se a Fig. B.6 com as respostas dos acelerómetros piezoeléctricos na situação de utilizar uma massa de 15kg. Com este procedimento procurou-se compreender se o sensor AP1 continuava a não exibir variação de aceleração face ao impulso e realmente mesmo com 15kg tal não se verificou. Quanto ao sensor localizado na Secção S4 a resposta deste foi boa, mas os valores permaneceram descabidos.

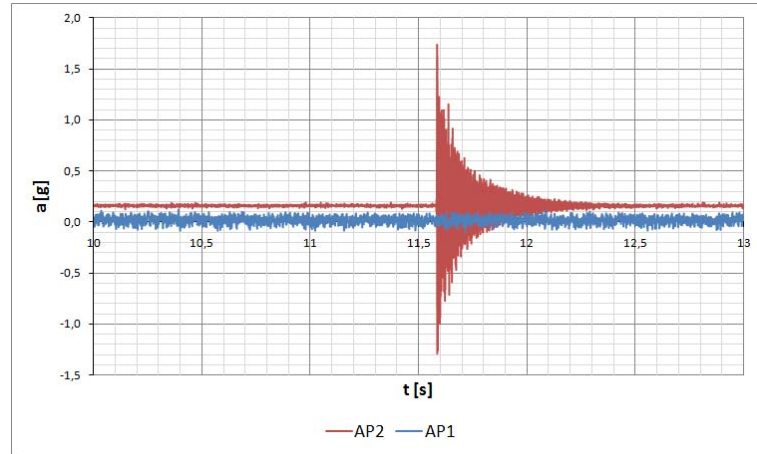


Fig. B.6 – Medições com acelerómetros AP1 e AP2 ( $M=15\text{kg}$ ).

Dado os valores de acelerações obtidos com os acelerómetros piezoeléctricos serem incongruentes, o que resultou em não poder ser realizada qualquer análise comparativa utilizando os valores de impulsos conhecidos, decidiu-se aplicar forças desconhecidas sobre o perfil, de modo a perceber se o problema anterior do sensor AP1 não se devia a este estar danificado.

Apresentam-se, assim, as Fig. B.7 e Fig. B.8, com as respostas isoladas destes sensores. Destas conclui-se que ambos os sensores estão em funcionamento.

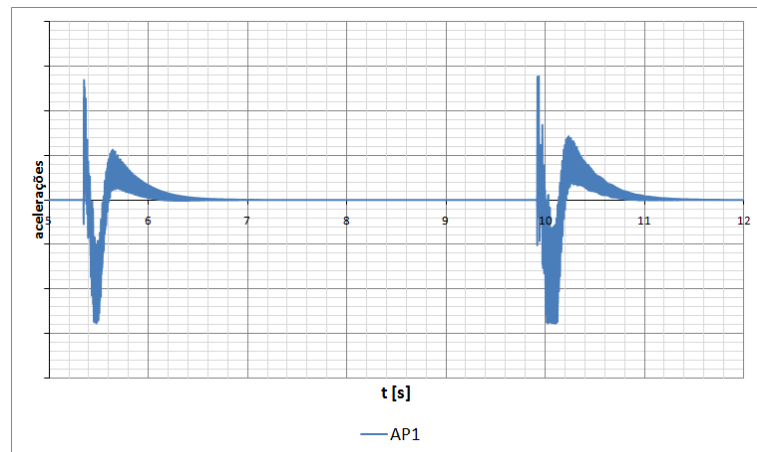


Fig. B.7 – Resposta do sensor AP1 a dois impulsos desconhecidos aplicados ao perfil.

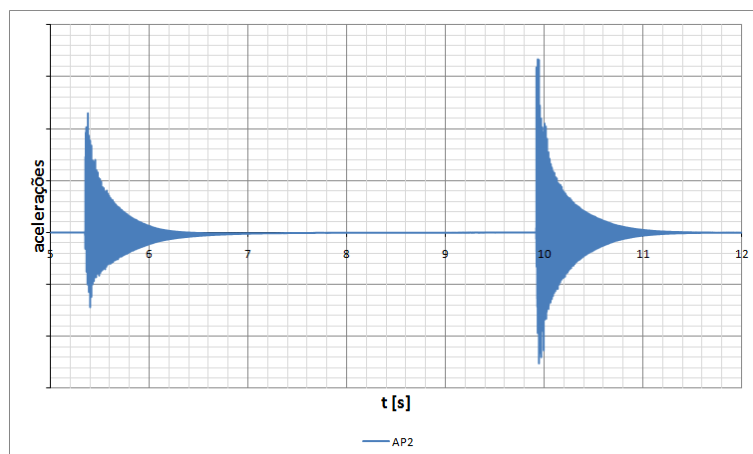


Fig. B.8 – Resposta do sensor AP2 a dois impulsos desconhecidos aplicados ao perfil.

### B.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que os ensaios foram inconclusivos, tanto do ponto de vista de avaliação de acelerações medidas, como de comparação entre as tecnologias pretendidas, do ponto de vista do autor, é aconselhável realizar mais ensaios com sensores MEMS, nomeadamente em barras encastradas mais flexíveis cujas propriedades estejam bem definidas. De facto, o demonstrador laboratorial aqui apresentado não constitui a melhor solução para primeiros ensaios com esta tecnologia, pelo que se recomendam estruturas mais simples de modo poder-se-ia simular numericamente a sua resposta e comparar posteriormente os valores obtidos dos ensaios laboratoriais com os previstos no modelo de elementos finitos.

É também aconselhável o uso de um sistema de carregamento diferente, tal como um actuador automático de impulsos. Deste modo, poder-se-iam simular mesmo em estruturas mais complexas cargas pontuais instantâneas com maior rigor.

Por último refere-se que os sensores da PCB utilizados não foram os mais indicados. Como solução alternativa ao modelo 352B10 indica-se a versão anterior 352B, a qual permite realizar ensaios numa gama de acelerações mais baixa,  $\pm 5g$ , e apresenta uma sensibilidade de apenas  $\pm 5\%$ .