

INSTITUTO POLITÉCNICO DO PORTO



MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE
ESTRUTURAS DE BETÃO

CARLOS MANUEL DA SILVA FÉLIX

ABRIL DE 2002

INSTITUTO POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO

CARLOS MANUEL DA SILVA FÉLIX

Dissertação apresentada a concurso para provimento de uma vaga de professor-coordenador do quadro do Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto, na área científica de Engenharia Civil, grupo de disciplinas de Estruturas, nos termos da alínea b) do n.º 1 do artigo 26.º do Decreto-Lei n.º 185/81, de 1 de Julho.

ABRIL DE 2002

ÍNDICE GERAL

RESUMO	v
ABSTRACT.....	vii
RESUME.....	ix
AGRADECIMENTOS.....	xi
ÍNDICE DE TEXTO.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xxi
ÍNDICE DE QUADROS	xxxi
GLOSSÁRIO	xxxiii
CAPÍTULO 1 — INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 — A MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS	7
CAPÍTULO 3 — CARACTERÍSTICAS DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....	25
CAPÍTULO 4 — MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO.....	39
CAPÍTULO 5 — MEDIÇÃO DA EXTENSÃO.....	45
CAPÍTULO 6 — MEDIÇÃO DA TEMPERATURA.....	85
CAPÍTULO 7 — MEDIÇÃO DA PRESSÃO.....	107
CAPÍTULO 8 — MEDIÇÃO DA INCLINAÇÃO	117
CAPÍTULO 9 — SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA.....	125
CAPÍTULO 10 — APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO A ESTRUTURAS DE BETÃO.....	135
CAPÍTULO 11 — ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM SERVIÇO DE UMA BOX-CULVERT	187
CAPÍTULO 12 — CONSIDERAÇÕES FINAIS	225
BIBLIOGRAFIA	229

RESUMO

Com o presente trabalho pretende-se estudar sistemas de monitorização do comportamento de estruturas, com especial incidência nas estruturas de betão. Considera-se fundamental o conhecimento das potencialidades e limitações dos sistemas de medição actualmente existentes, de modo a permitir a sua correcta aplicação às estruturas, e consequente análise e interpretação do comportamento estrutural.

A dissertação começa por apresentar uma descrição geral dos sistemas de monitorização de estruturas; introduzem-se os conceitos e a terminologia associados à metrologia e à caracterização dos instrumentos de medição, incidindo de modo particular sobre os instrumentos correntemente utilizados nas operações de monitorização. Em particular referem-se os instrumentos clássicos destinados à medição do deslocamento, da extensão, da temperatura, da pressão e da inclinação.

O advento dos sensores de fibra óptica, e em particular dos sensores de Bragg, com características muito particulares de funcionamento, justificam uma referência especial na dissertação. Estes sensores têm sido aplicados com sucesso na monitorização de diversas estruturas, nomeadamente pontes e barragens, permitindo obter informação essencial acerca do seu comportamento ao longo do tempo.

Descreve-se a aplicação pelo autor de sistemas de monitorização a estruturas de betão armado e/ou pré-esforçado, nomeadamente a duas passagens hidráulicas, a uma ponte e a um viaduto. Relativamente a cada caso apresentado, descrevem-se as características da estruturas e do sistema de monitorização adoptado. Apresenta-se ainda uma interpretação sumária dos valores medidos em algumas dessas aplicações.

Procede-se à análise do comportamento de uma das estruturas instrumentadas com base na medição efectuada em obra. Exemplifica-se deste modo as potencialidades dos sistemas de monitorização na interpretação do comportamento estrutural.

A encerrar este trabalho, tecem-se algumas considerações genéricas acerca do trabalho realizado e apontam-se algumas sugestões tendo em vista o futuro desenvolvimento do tema.

ABSTRACT

The present work aims studying monitoring systems applied to structural behaviour, in particular to concrete structures. The correct and efficient use of these systems, allowing us to get high quality results on structural behaviour, depends on the knowledge one has of the potential and shortcomings of nowadays measuring systems.

The work starts by a detailed description of monitoring systems applied to structures. It introduces the concepts and terminology associated to metrology and to the characterization of measuring instruments, especially those currently used in monitoring operations. In particular, the work refers to standard instruments one uses to measure displacement, strain, temperature, pressure and inclination.

The development of fibre optical sensors in general, and Bragg sensors in particular, with private functioning characteristics, also justify the especial reference that is made in the work. Fibre optical sensors have been applied to monitoring of structures with success, namely to bridges and dams, allowing getting critical information on the structural behaviour versus time.

The author applied monitoring systems to reinforced and/or pre-stressed concrete structures, namely two hydraulic crossings, one bridge and one viaduct. The characteristics of these structures and the monitoring system adopted for each case are described and the values measured in some of these applications are briefly analysed.

Finally, the author studies the behaviour of one of the monitored structures using the *in situ* measurements. The quality of the data and of the information achieved with this analysis, shows the high potential of monitoring systems and supports the main idea of the final conclusions, i.e. that such systems constitute an important tool to observe and understand the behaviour of structures.

RESUME

Ce travail vise à étudier des systèmes de monitoring appliqués à la mécanique des structures, en particulier, en béton armé. L'utilisation correcte et efficace de ces systèmes, qui nous permettent d'obtenir des informations d'excellente qualité sur le comportement des structures, dépend de la connaissance que chacun peut avoir sur les possibilités et les limitations des systèmes de mesure actuels.

Ce document débute par une description détaillée des systèmes de monitoring des structures. Il introduit les concepts et la terminologie propre à la métrologie et à la caractérisation des appareils de mesure les plus couramment utilisés lors des opérations de monitoring. En particulier, ce travail se réfère aux appareils de mesure des déplacements, déformations, de la température, pression et inclinaison.

Le développement des capteurs utilisant des fibres optiques et, plus particulièrement des réseaux de Bragg, qui ont des caractéristiques de fonctionnement particulières, justifie les nombreuses références faites à ces capteurs dans ce travail. Les fibres optiques ont été appliquées avec succès au monitoring des structures telles que les ponts et les barrages permettant d'obtenir des informations capitales sur l'évolution dans le temps du comportement structurel.

L'auteur a appliqué des systèmes de monitoring à des structures en béton armé et en béton précontraint qui sont deux ouvrages hydrauliques, un pont et un viaduc. Les caractéristiques de ces structures et des systèmes de monitoring utilisés pour chaque campagne de mesures sont décrits et les résultats principaux sont brièvement analysés.

Enfin, l'auteur étudie le comportement de l'une de ces structures en utilisant les résultats de mesures in-situ. La qualité des données et des informations fournies par cette analyse met en évidence le fort potentiel des systèmes de monitoring et permet de défendre la principale conclusion de ce travail qui est que les systèmes de monitoring représentent un outils majeur pour observer et comprendre le comportement des structures.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido no seio do Laboratório de Estruturas (LE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), entidade que apoiou o desenvolvimento deste projecto e colocou à minha disposição todos os meios necessários à sua realização. Neste projecto descobri quão benéfico pode ser o relacionamento simbiótico entre instituições, nas quais tenho desenvolvido actividade, nomeadamente, Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto (ISEP) e FEUP. Por tudo isto, agradeço a ambas as instituições.

Desejo também expressar o mais profundo agradecimento a todos que de algum modo contribuíram para a concretização deste trabalho, todos com quem na FEUP e no ISEP tenho contactado, Professores, Colegas, Técnicos e Alunos. De forma muito especial, devo-me referir:

— ao Professor Joaquim A. Figueiras, pela forma contagiante como abraça a via experimental;

— aos professores Rui Faria e Adriano S. Carvalho, pela segurança que transmitem e pelo precioso apoio nas questões mais técnicas;

— ao Grupo de Optoelectrónica do INESC, infalíveis parceiros de trabalho;

— à Dr.^a Leonor Pinto e aos professores Emília Cascaes, Rui Santos e José Carvalho, que desde a primeira hora apoiaram e incentivaram a minha actividade na investigação;

— à Paula e ao Amândio, excelentes técnicos de laboratório que, com assinalável empenho e dedicação, tiveram uma contribuição definitiva na aplicação e no desenvolvimento das técnicas aqui referidas, quer em laboratório, quer em obra;

— ao Alexandre, não só pelos ensinamentos de *Autocad*, nem pelos desenhos aqui apresentados, mas também pelos jantares que em geral se lhes seguiam;

Não esqueço também o apoio da família e dos amigos, tantas vezes privados da minha companhia, em especial dos três pequenitos, do José e do João.

Finalmente, desejo exprimir o mais profundo reconhecimento aos meus Pais, pela compreensão e pelo carinho com que sempre souberam abraçar este projecto, que também lhes pertence.

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1 — INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 A Situação em Portugal.....	3
1.3 Objectivos e Organização da Dissertação.....	4
CAPÍTULO 2 — A MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS	7
2.1 Objectivo da Monitorização de Estruturas	7
2.2 Fases de Intervenção.....	9
2.2.1 Introdução	9
2.2.2 Projecto.....	9
2.2.3 Execução ou construção.....	10
2.2.4 Final da obra	10
2.2.5 Exploração	10
2.2.6 Situação de acidente	11
2.2.7 Reparação, reabilitação e reforço.....	11
2.3 Grandezas a Medir.....	12
2.4 Interpretação das Medições.....	14
2.5 Sistemas de Monitorização	16
2.6 Deficiências em Sistemas de Monitorização.....	20

2.7	Estruturas Inteligentes.....	23
CAPÍTULO 3 — CARACTERÍSTICAS DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO		25
3.1	Introdução.....	25
3.2	Metrologia.....	26
3.2.1	Grandezas e unidades.....	26
3.2.2	Múltiplos e submúltiplos.....	27
3.2.3	Metrologia.....	27
3.2.4	Métodos de medição.....	28
3.2.5	Erro de medição.....	29
3.3	Características de Instrumentos de Medição.....	30
3.3.1	Instrumentos de medição.....	30
3.3.2	Características dos instrumentos de medição.....	30
3.4	Transdutores Eléctricos.....	35
3.4.1	Introdução.....	35
3.4.2	Condicionamento do sinal analógico.....	35
3.5	Sensores de Fibra Óptica.....	37
CAPÍTULO 4 — MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO		39
4.1	Introdução.....	39
4.2	Blocos Padrão.....	40
4.3	Instrumentos Baseados num Fuso Micrométrico.....	40
4.4	Instrumentos Baseados numa Régua de Traços.....	41

4.5	Comparadores Mecânicos	41
4.6	Instrumentos Capacitivos	42
4.7	Transdutor de Relutância Variável.....	43
CAPÍTULO 5 — MEDIÇÃO DA EXTENSÃO		45
5.1	Introdução	45
5.2	Obtenção da Extensão a Partir do Deslocamento	47
5.3	Extensómetro de Corda Vibrante.....	47
5.3.1	Princípio de funcionamento	47
5.3.2	Extensómetros de embeber no betão.....	51
5.3.3	Extensómetros de aplicar à superfície.....	52
5.4	Extensómetro de Resistência Eléctrica.....	53
5.4.1	Princípio de funcionamento	53
5.4.2	Medição da resistência	57
5.4.3	Ponte de Wheatstone	57
5.4.4	Obtenção das extensões a partir da ponte de Wheatstone	60
5.4.5	Ligação de extensómetros em quarto de ponte	66
5.4.6	Efeito da variação da temperatura sobre os extensómetros	73
5.4.7	Fontes de erro na medição	77
5.4.8	Extensómetros de aplicar à superfície.....	78
5.4.9	Extensómetros de embeber no betão.....	82
5.4.10	Sensores baseados em extensometria de resistência	84

CAPÍTULO 6 — MEDIÇÃO DA TEMPERATURA	85
6.1 Introdução	85
6.2 Termopares	86
6.3 Detectores de Temperatura Resistivos	92
6.4 Termistores	97
6.5 Medições de Temperatura	100
6.5.1 Medição da temperatura ambiente	100
6.5.2 Medição da temperatura no interior de um prisma de betão	106
CAPÍTULO 7 — MEDIÇÃO DA PRESSÃO	107
7.1 Introdução	107
7.2 Células de Pressão Convencionais	108
7.3 Outras Células de Pressão	113
7.4 Considerações Finais	114
CAPÍTULO 8 — MEDIÇÃO DA INCLINAÇÃO	117
8.1 Introdução	117
8.2 Clinómetro de Bolha de Ar	118
8.3 Inclinómetros Eléctricos	121
CAPÍTULO 9 — SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA	125
9.1 Introdução	125
9.2 Funcionamento dos Sensores de Fibra Óptica	126

9.2.1	Princípio de funcionamento	126
9.2.2	Principais vantagens	128
9.2.3	Sensores de fibra óptica desenvolvidos	128
9.3	Exemplo de Aplicação Laboratorial.....	130
9.3.1	Introdução	130
9.3.2	Preparação dos provetes.....	130
9.3.3	Condução do ensaio	131
9.3.4	Resultados obtidos	132
9.4	Outros Sensores de Fibra Óptica.....	133

CAPÍTULO 10 — APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO A ESTRUTURAS DE BETÃO135

10.1	Introdução	135
10.2	Monitorização de uma Box-Culvert Durante a Construção e Ensaio de Carga	136
10.2.1	Introdução	136
10.2.2	Descrição da secção instrumentada.....	137
10.2.3	Faseamento construtivo.....	138
10.2.4	Ensaio de carga	140
10.2.5	Sistema de observação	142
10.2.6	Observações	144
10.2.7	Conclusões	150
10.3	Monitorização de uma Box-Culvert Durante a Construção.....	151
10.3.1	Introdução	151
10.3.2	Descrição da secção instrumentada.....	152

10.3.3	Instalação dos extensómetros de embeber no betão	153
10.3.4	Instalação das células de pressão	156
10.3.5	Sistema de monitorização adoptado	159
10.3.6	Resultados obtidos	162
10.3.7	Considerações finais	167
10.4	Projecto de Monitorização da Ponte Infante D. Henrique	168
10.4.1	Introdução	168
10.4.2	Sistema de monitorização	171
10.4.3	Aplicação em obra do sistema de monitorização	172
10.5	Monitorização do Viaduto Sobre a VCI no Porto.....	179
10.5.1	Introdução	179
10.5.2	Descrição da estrutura	179
10.5.3	Descrição do sistema de monitorização	181
CAPÍTULO 11 — ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM SERVIÇO DE UMA BOX-CULVERT.....		187
11.1	Introdução.....	187
11.2	Descrição da Secção Instrumentada	188
11.3	Resultados da Observação	191
11.4	Distribuição de Pressões do Solo sobre a Box-Culvert	194
11.4.1	Introdução	194
11.4.2	Distribuição de pressões em estruturas enterradas	195
11.4.3	Métodos simplificados de cálculo.....	196
11.4.4	Aplicação das metodologias simplificadas.....	199

11.4.5	Avaliação das metodologias simplificadas de cálculo	202
11.5	Modelação do Comportamento dos Materiais Estruturais	204
11.5.1	Introdução	204
11.5.2	Módulo de elasticidade	204
11.5.3	Retracção do betão.....	205
11.5.4	Fluência do betão	206
11.5.5	Armaduras passivas	207
11.6	Esforços Induzidos na Estrutura	207
11.6.1	Introdução	207
11.6.2	Ajuste do modelo de comportamento do betão	209
11.6.3	Avaliação das metodologias simplificadas de cálculo	214
11.6.4	Evolução dos esforços na BC.....	219
11.7	Considerações Finais.....	222
CAPÍTULO 12 — CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		225

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 — INTRODUÇÃO

Figura 1.1 — Exemplo de duas obras actualmente em observação pelo LE.....	3
---------------------------------------------------------------------------	---

CAPÍTULO 2 — A MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Figura 2.1 — Par de prismas de retracção instalado em obra.	15
Figura 2.2 — Sistema de fluência instalado em obra.	15
Figura 2.3 — Esquema geral de um sistema de monitorização.	17
Figura 2.4 — Exemplo de um posto de observação instalado em obra.	18
Figura 2.5 — Configuração de um sistema de monitorização.	19
Figura 2.6 — Equipamento de aquisição de sinal.....	20
Figura 2.7 — Cabos danificados em obra.....	22
Figura 2.8 — Emenda por soldadura dos cabos condutores e respectiva protecção.	22

CAPÍTULO 3 — CARACTERÍSTICAS DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Figura 3.1 — Definição de sensibilidade.....	31
Figura 3.2 — Conceitos de folga, histerese e saturação.	32
Figura 3.3 — Erro de zero.....	33
Figura 3.4 — Conceito de linearidade.....	33
Figura 3.5 — Tempo de resposta de um instrumento de medição.....	34

CAPÍTULO 4 — MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO

Figura 4.1 — Blocos Padrão.	40
Figura 4.2 — Comparador mecânico de deslocamento.....	41
Figura 4.3 — Comparador digital de deslocamento.....	42
Figura 4.4 — Paquímetro digital.....	42
Figura 4.5 — Estrutura básica de um LVDT.	43
Figura 4.6 — Amplitude da tensão de saída de um LVDT.....	44
Figura 4.7 — Transdutores indutivos de deslocamento, LVDT.	44

CAPÍTULO 5 — MEDIÇÃO DA EXTENSÃO

Figura 5.1 — Esquema de funcionamento de um extensómetro de corda vibrante.....	48
Figura 5.2 — Efeito da variação de temperatura num extensómetro de corda vibrante.	50
Figura 5.3 — Exemplo de um extensómetro de corda vibrante.....	51
Figura 5.4 — Aplicação em obra de um extensómetro de corda vibrante.....	52
Figura 5.5 — Extensómetro de corda vibrante para aplicação à superfície.	52
Figura 5.6 — Extensómetro de corda vibrante para medição de abertura de fendas.	53
Figura 5.7 — Extensómetro de resistência.	56
Figura 5.8 — Circuito da ponte de Wheatstone.	58
Figura 5.9 — Ponte de medição pelo método diferencial.	60
Figura 5.10 — Ligação de um extensómetro à ponte de Wheatstone com um braço activo.	61
Figura 5.11 — Modelo sujeito à flexão simples: circuito em ponte de dois braços activos.	63
Figura 5.12 — Medição de extensões com circuito em ponte de dois braços activos.	64

Figura 5.13 — Modelo sujeito à tracção simples: circuito em ponte de dois braços activos.....	65
Figura 5.14 — Modelo sujeito à flexão simples: circuito em ponte de quatro braços activos.	66
Figura 5.15 — Ligação de um extensómetro em quarto de ponte com dois fios.	67
Figura 5.16 — Ligação de um extensómetro em quarto de ponte com três fios.	70
Figura 5.17 — Factor de perda nas ligações em quarto de ponte, a dois e a três fios.	71
Figura 5.18 — Circuito em meia ponte para compensação da temperatura.	74
Figura 5.19 — Dois modelos sujeitos a variação de temperatura.	75
Figura 5.20 — Extensómetro de embeber no betão.	83
Figura 5.21 — Protecção mecânica adicional do extensómetro.....	83
Figura 5.22 — Aplicação em obra de uma roseta de extensómetros.....	83
Figura 5.23 — Medição de abertura de fendas com base em extensometria eléctrica.....	84

CAPÍTULO 6 — MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

Figura 6.1 — Princípio de funcionamento dos termopares.....	87
Figura 6.2 — Exemplo de um termopar do tipo K.....	88
Figura 6.3 — Uso de extensões em termopares.	88
Figura 6.4 — Curvas características de f.e.m. e de sensibilidade de alguns termopares.....	90
Figura 6.5 — Amplificador de sinal para termopares.....	91
Figura 6.6 — Esquemas de ligação em ponte de Wheatstone de um RTD com três fios.....	95
Figura 6.7 — Exemplo de um sensor de temperatura PT100.	96
Figura 6.8 — Sensor de temperatura PT100 de embeber no betão.....	96
Figura 6.9 — Exemplo do sensor de temperatura PCR100.	97
Figura 6.10 — Variação da resistência com a temperatura de um termistor.	98

Figura 6.11 — Esquema e encapsulamento de um termistor do tipo NTC.....	98
Figura 6.12 — Protótipo de um sensor de temperatura realizado com base num LM35.	99
Figura 6.13 — Sensor de temperatura LM35 antes e após o encapsulamento.....	99
Figura 6.14 — Temperatura ambiente lida nos diversos sensores.....	100
Figura 6.15 — Sensores de temperatura no interior da estufa.	101
Figura 6.16 — Valores lidos no LM35 e no PT100 na estufa a 30°C.	102
Figura 6.17 — Valores lidos no LM35 e no PT100 na estufa a 40°C.	102
Figura 6.18 — Temperaturas lidas em diversos tipos de sensores.	103
Figura 6.19 — Temperaturas lidas para os diversos tipos de sensores no período em referência....	105
Figura 6.20 — Temperatura exterior e interior a um prisma de betão.	106

CAPÍTULO 7 — MEDIÇÃO DA PRESSÃO

Figura 7.1 — Corte transversal de uma célula de pressão de encastrar no betão.....	109
Figura 7.2 — Representação esquemática de um célula de pressão.	111
Figura 7.3 — Sensor de pressão de corda vibrante para aplicação à superfície.	113
Figura 7.4 — Sensor para desenvolvimento de detectores de força e pressão.	114

CAPÍTULO 8 — MEDIÇÃO DA INCLINAÇÃO

Figura 8.1 — Clinómetro de bolha de ar Stoppani.....	119
Figura 8.2 — Base de inclinómetro e respectiva capa de protecção.....	120
Figura 8.3 — Clinómetro de bolha de ar na base durante a operação de medição em obra.....	121
Figura 8.4 — Inclinómetro eléctrico modelo 685B-10 da RDP Electronics, Limited.	122
Figura 8.5 — Inclinómetro eléctrico aplicado em obra.	124

CAPÍTULO 9 — SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

Figura 9.1 — Representação esquemática do princípio de funcionamento das redes de Bragg.	127
Figura 9.2 — Sensor de fibra óptica para embeber no betão.	129
Figura 9.3 — Sensor de fibra óptica de superfície.	129
Figura 9.4 — Extensómetro eléctrico posicionado no provete antes da betonagem.	130
Figura 9.5 — Pormenor dos sensores externos instalados no provete prismático.	131
Figura 9.6 — Ensaio de compressão simples do provete prismático (vista geral).	132
Figura 9.7 — Resultado do ensaio de compressão simples do provete prismático.	133
Figura 9.8 — Célula de pressão em fibra óptica.	134

CAPÍTULO 10 — APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO A ESTRUTURAS DE BETÃO

Figura 10.1 — Vista geral da obra.	137
Figura 10.2 — Colocação dos elementos pré-fabricados.	138
Figura 10.3 — Selagem das juntas com tela asfáltica.	138
Figura 10.4 — Drenagem do tardo dos montantes da BC.	138
Figura 10.5 — Colocação do material de aterro na zona lateral da estrutura.	139
Figura 10.6 — Adensamento do material de aterro por percolação.	140
Figura 10.7 — Veículo utilizado no ensaio de carga.	140
Figura 10.8 — Dimensões em planta do eixo traseiro do camião.	141
Figura 10.9 — Disposição dos LVDT's no interior da BC (vista geral).	142
Figura 10.10 — Pormenor dos LVDT's 2 e 10.	143
Figura 10.11 — Pormenor do LVDT 9.	143

Figura 10.12 — IMP, concentrador de sinal e fonte de alimentação.	143
Figura 10.13 — Deslocamentos medidos pelos LVDT's 1 a 3 nas diversas situações de ensaio.	147
Figura 10.14 — Deslocamentos medidos pelos LVDT's 4 a 7 nas diversas situações de ensaio.	148
Figura 10.15 — Modos de deformação da Box-Culvert.	148
Figura 10.16 — Deslocamentos medidos pelos LVDT's 8 e 9 nas diversas situações de ensaio.	149
Figura 10.17 — Deslocamentos medidos pelo LVDT 10 nas diversas situações de ensaio.	149
Figura 10.18 — Vista geral do local da obra.	152
Figura 10.19 — Dimensões da secção transversal da box-culvert.	153
Figura 10.20 — Elementos instalados em obra.	153
Figura 10.21 — Posicionamento dos extensómetros na secção.	154
Figura 10.22 — Armadura do elemento a instrumentar.	154
Figura 10.23 — Posicionamento do extensómetro SG1 e registo do seu posicionamento.	154
Figura 10.24 — Pormenores de extensómetros instalados.	155
Figura 10.25 — Colocação da armadura no interior do molde.	155
Figura 10.26 — Box-Culvert durante e após a betonagem.	156
Figura 10.27 — Posicionamento das células de pressão sobre a BC.	157
Figura 10.28 — Vista geral do local da obra e do acesso ao interior.	158
Figura 10.29 — Protecção mecânica do sensor de pressão.	159
Figura 10.30 — Camada de aterro colocada sobre as células de pressão.	159
Figura 10.31 — Esquema de montagem do sistema de monitorização.	160
Figura 10.21 — Posto de observação instalado no interior da box-culvert.	161
Figura 10.33 — Evolução da altura de aterro sobre a secção instrumentada da box-culvert.	162
Figura 10.34 — Valores lidos nas células de pressão.	163

Figura 10.35 — Valores lidos nos extensómetros a meio vão da travessa.....	164
Figura 10.36 — Valores lidos nos extensómetros da travessa, junto aos montantes.....	165
Figura 10.37 — Valores lidos nos extensómetros dos montantes.....	165
Figura 10.38 — Evolução diária das temperaturas às 6:00 horas.....	166
Figura 10.39 — Evolução diária da temperatura.....	167
Figura 10.40 — Perspectiva da futura Ponte Infante D. Henrique, no Porto.....	168
Figura 10.41 — Localização das secções instrumentadas e dos postos de observação da Ponte Infante D. Henrique.....	170
Figura 10.42 — Posicionamento das secções ligadas ao Posto de Observação PO2.....	173
Figura 10.43 — Montante M1 e arranque do arco na fase de instalação dos extensómetros.....	173
Figura 10.44 — Posto de observação PO2 instalado numa abertura do montante M1.....	174
Figura 10.45 — Esquema de ligações do pilar provisório PP1.....	174
Figura 10.46 — Arranque do pilar provisório PP1.....	175
Figura 10.47 — Posicionamento das secções ligadas ao Posto de Observação PO3.....	175
Figura 10.48 — Extensómetro instalado no montante M6.....	176
Figura 10.49 — Montante M6 e pilar provisório PP2 (vista do lado de Gaia).....	176
Figura 10.50 — Esquema previsto para a instalação do pilar provisório PP2.....	177
Figura 10.51 — Base do pilar provisório PP2 durante a instalação dos extensómetros.....	177
Figura 10.52 — Posto de observação provisório na base do pilar provisório PP2.....	178
Figura 10.53 — Instalação de extensómetros na escora E3.....	178
Figura 10.54 — Localização das secções instrumentadas e dos postos de observação do Viaduto sobre a VCI, no Porto.....	180
Figura 10.55 — Localização dos sensores instalados nas secções S1 e S2 do tabuleiro.....	184
Figura 10.56 — Localização das secções ligadas ao posto de observação PO2.....	184

Figura 10.57 — Localização dos sensores instalados nas secções S3 e S4 do tabuleiro.....	185
Figura 10.58 — Localização dos sensores instalados nas secções S6 e S7 do mastro.....	185
Figura 10.59 — Localização dos sensores instalados na secção S5 do tabuleiro	186

CAPÍTULO 11 — ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM SERVIÇO DE UMA BOX-CULVERT

Figura 11.1 — Secção transversal da BC instrumentada.	189
Figura 11.2 — Armaduras da secção instrumentada.....	189
Figura 11.3 — Localização dos extensómetros e dos alinhamentos S1 a S5.....	190
Figura 11.4 — Posicionamento das células de pressão e dos sensores de temperatura.....	190
Figura 11.5 — Temperatura observada diariamente às 6:00 horas.	191
Figura 11.6 — Pressão do solo medida diariamente às 6:00 horas.	192
Figura 11.7 — Extensão medida diariamente às 6:00 horas.	193
Figura 11.8 — Processo de redistribuição de pressões numa BC.	195
Figura 11.9 — Modelo simplificado de cálculo (Maprel, 1998).	196
Figura 11.10 — Modelo simplificado de cálculo (Cardoso, 1998).....	197
Figura 11.11 — Modelo simplificado de cálculo (Sang, 2000).....	199
Figura 11.12 — Geometria do sistema estrutural da BC instrumentada.	200
Figura 11.13 — Aplicação do modelo simplificado de cálculo (Maprel, 1998).....	200
Figura 11.14 — Aplicação do modelo simplificado de cálculo (Cardoso, 1998).....	201
Figura 11.15 — Aplicação do modelo simplificado de cálculo (Sang, 2000).	202
Figura 11.16 — Pontos de medição da pressão sobre a BC.....	202
Figura 11.17 — Temperatura uniforme $(T_{amb.} + T_{aterro})/2$	208
Figura 11.18 — Temperatura diferencial $(T_{amb.} - T_{aterro})$	208

Figura 11.19 — Diagrama parabólico da pressão do solo.....	210
Figura 11.20 — Ajuste da resultante vertical dos esforços à pressão.....	211
Figura 11.21 — Extensão devida à retracção.....	212
Figura 11.22 — Coeficiente de fluência.....	212
Figura 11.23 — Fendilhação na travessa da BC instrumentada.....	217
Figura 11.24 — Temperatura uniforme $(T_{amb} + T_{aterro})/2$	219
Figura 11.25 — Temperatura diferencial $(T_{amb} - T_{aterro})$	220
Figura 11.26 — Evolução do pressão medida.....	220
Figura 11.27 — Evolução do esforço axial em alinhamentos instrumentados.....	221
Figura 11.28 — Evolução do esforço de flexão em alinhamentos instrumentados.....	222

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 2 — A MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Quadro 2.1 — Principais deficiências na instalação de sensores de embeber no betão.....	21
-----------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 3 — CARACTERÍSTICAS DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Quadro 3.1 — Exemplos de unidades derivadas do SI.....	26
--------------------------------------------------------	----

Quadro 3.2 — Múltiplos e submúltiplos do SI.....	27
--------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 5 — MEDIÇÃO DA EXTENSÃO

Quadro 5.1 — Sinal de saída para diferentes configurações da ponte de Wheatstone (Pallas-Areny e Webster, 1991).....	67
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Quadro 5.2 — Configurações mais frequentes de extensómetros.....	80
------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 6 — MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

Quadro 6.1 — Caracterização sumária de algumas configurações padrão de termopares.....	89
----------------------------------------------------------------------------------------	----

Quadro 6.2 — Protecção às junções de medição em termopares.....	91
-----------------------------------------------------------------	----

Quadro 6.3 — Especificações de alguns RTD's.....	94
--------------------------------------------------	----

Quadro 6.4 — Principais características técnicas da PCR100.....	97
-----------------------------------------------------------------	----

Quadro 6.5 — Excerto de valores de temperatura lidos nos sensores.....	104
------------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO 7 — MEDIÇÃO DA PRESSÃO

Quadro 7.1 — Principais características técnicas de dois sensores de pressão.	112
------------------------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO 8 — MEDIÇÃO DA INCLINAÇÃO

Quadro 8.1 — Valores impostos e valores medidos no clinómetro.	120
---------------------------------------------------------------------	-----

Quadro 8.2 — Características técnicas do inclinómetro eléctrico modelo KB-1AC.....	123
------------------------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO 10 — APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO A ESTRUTURAS DE BETÃO

Quadro 10.1 — Peso por eixo do camião.	141
---------------------------------------------	-----

Quadro 10.2 — Descrição das situações observadas.	144
--------------------------------------------------------	-----

Quadro 10.3 — Valores dos deslocamentos medidos pelos LVDT's em mm.	146
--------------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO 11 — ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM SERVIÇO DE UMA BOX-CULVERT

Quadro 11.1 — Valores do coeficiente A_c	198
---------------------------------------------------	-----

Quadro 11.2 — Valores recomendados para a razão de assentamento.....	198
----------------------------------------------------------------------	-----

Quadro 11.3 — Valores indicativos dos parâmetros s_1 a s_5 (Sang, 2000).	199
-----------------------------------------------------------------------------------	-----

Quadro 11.4 — Valores obtidos para os parâmetros s_1 a s_5	201
-----------------------------------------------------------------------	-----

Quadro 11.5 — Pressão em quatro pontos da BC instrumentada \square kPa \square	203
-------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Quadro 11.6 — Valores do coeficiente s	205
-------------------------------------------------	-----

Quadro 11.7 — Soluções possíveis para os coeficientes de ajuste.	210
-----------------------------------------------------------------------	-----

Quadro 11.8 — Valores mínimos e máximos dos coeficientes de ajuste (Santos, 2001).	213
-----------------------------------------------------------------------------------------	-----

Quadro 11.9 — Casos de carga considerados na estrutura porticada.	215
------------------------------------------------------------------------	-----

Quadro 11.10 — Esforços normais e de flexão nos alinhamentos S1 a S5.	216
----------------------------------------------------------------------------	-----

GLOSSÁRIO

No presente trabalho é utilizado um conjunto de termos, obtidos a partir da designação anglo-saxónica, cuja tradução não é literal. Julga-se por isso conveniente a apresentação de uma lista contendo as principais traduções adoptadas.

Designação anglo-saxónica:

Accuracy
Bias
Compensated temperature range
Drift
Dummy
Fidelity
Gage factor
Gage pattern
Hysteresis
Linearity
Loop
Measuring range
Microstrain
Offset
Operating temperature range
Random errors
Rated output
Repeatability
Reproductivity
Sensitivity
Stability
Threshold

Designação em português:

Exactidão, precisão ou acuidade
Erros sistemáticos
Gama de temperatura compensada
Deriva
Resistência de valor nominal constante
Fidelidade
Factor de ganho
Malha do extensómetro
Histerese
Linearidade
Espiral
Gama ou campo de medição
microdeformação
Erro de zero
Gama de temperatura de funcionamento
Erros aleatórios
Ampliação ou ganho
Repetibilidade
Reprodutibilidade
Sensibilidade
Estabilidade
Folga

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde os primeiros tempos que o homem tem observado as construções que foi executando, tendo obtido dessa observação importantes ensinamentos que foram sendo aplicados nas construções seguintes. Ainda que desconhecesse os conceitos de segurança e de durabilidade nos moldes hoje difundidos, foram essas as directivas que nortearam desde sempre o desenvolvimento de novas técnicas construtivas e a aplicação de novos materiais.

Associado ao crescimento económico e social foram surgindo novas necessidades. A necessidade de desenvolvimento das vias de comunicação obrigou à construção de pontes para o atravessamento de obstáculos naturais como os vales mais profundos e os rios. O aproveitamento dos recursos hídricos conduziu à construção de barragens, à abertura de galerias e de túneis. A explosão demográfica impeliu, nos grandes aglomerados urbanos, à construção de edifícios em altura. Deste modo, foram surgindo estruturas de dimensão crescente e com exigências técnicas cada vez mais importantes.

A observação do comportamento das estruturas tem sustentado este desenvolvimento económico e social, na medida em que tem contribuído para aumentar o conhecimento do comportamento das estruturas. Naturalmente que os próprios sistemas de observação têm sido objecto de desenvolvimento. Nos primeiros tempos a observação era quase exclusivamente qualitativa e resultava de simples observações visuais. Hoje estão difundidos sistemas e sensores baseados na electrónica e na optoelectrónica que sustentam o conceito de monitorização do comportamento das estruturas.

Na monitorização do comportamento das estruturas, a medição das grandezas relevantes é realizada com recurso a sistemas de medição que fazem parte integrante da estrutura. Na sua essência, estes sistemas são constituídos por sensores, sistema de aquisição, de processamento e de armazenamento de informação e sistemas de comunicação, com elevado grau de automação, versatilidade e flexibilidade (Bergmeister e Santa, 2001). A sua integração na estrutura viabiliza o seu acompanhamento permanente, medindo, interpretando, sentindo a estrutura. É neste contexto que se pode afirmar que, nos mais recentes sistemas de monitorização estrutural, as estruturas são dotadas de sensibilidade.

Actualmente é possível o estabelecimento de comunicação entre o sistema instalado na estrutura e uma estação remota, viabilizando-se deste modo a transferência, em tempo real, de toda a informação disponível sobre a estrutura, para uma rede global de informação.

Uma outra importante característica dos sistemas de monitorização é a possibilidade de gerarem sinais de alarme, quando determinados parâmetros predefinidos são excedidos. Quando estes sistemas, além destas características, têm poder decisório, e podem intervir automaticamente nas estruturas, constituem a essência das designadas estruturas inteligentes.

Nos sistemas de monitorização estrutural o acompanhamento do comportamento das estruturas ao longo do tempo é realizado através da medição permanente de grandezas tão diversas como a extensão, o deslocamento, a temperatura, a humidade relativa, a pressão, a inclinação, entre outras. O cruzamento deste manancial de informação, desde que devidamente interpretado, permite estudar, entre outros aspectos, a durabilidade dos materiais que constituem a estrutura, o comportamento reológico dos materiais e os efeitos na estrutura da adopção de um determinado processo construtivo. Este estudo assume maior relevância nas situações em que são adoptados novos materiais, novas técnicas construtivas ou quando são difíceis de definir critérios de verificação da segurança e condições de ligação e de interacção entre os diferentes materiais constituintes da estrutura (Bastos, 1997). Por outro lado, têm sido largamente utilizados na aferição de normas regulamentares e de modelos teóricos de análise e na observação de comportamentos impossíveis de simular em laboratório.

Paralelamente, o desenvolvimento de modelos numéricos de análise estrutural, com parâmetros quantificados a partir dos resultados obtidos pela via experimental, tem constituído um importante complemento à observação do comportamento das estruturas. A sua aplicação tem permitido a interpretação de medições efectuadas em obra e a previsão do comportamento das estruturas aquando da ocorrência de um estado limite.

1.2 A SITUAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, a observação do comportamento das estruturas mais importantes, tem sido levada a efeito pelo Núcleo de Observação de Estruturas, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Esta instituição é aliás uma instituição de referência não só a nível nacional mas também a nível mundial, tendo tido intervenções de vulto nos mais diversos países do mundo. Justificam-se por isso plenamente, as inúmeras referências neste trabalho, às técnicas de observação adoptadas pelo LNEC, que consta da vasta bibliografia que sobre o assunto tem vindo a ser publicada. Desde a primeira importante estrutura observada, a Ponte sobre o Rio Sousa, em 1948 (Rocha et al., 1955), até mais recentemente, a observação do Aeroporto de Santa Catarina no Funchal ou a Ponte Salgueiro Maia, em Santarém, tem assimilado e difundido um conjunto ímpar de conhecimentos e de experiências, que a simples aplicação das novas tecnologias não substitui.

Também as instituições vocacionadas para o ensino e a investigação têm dado o seu contributo para o desenvolvimento e aplicação de sistemas de monitorização e de observação de estruturas. Seria por isso injusto não ser feita uma referência explícita, entre outros, aos trabalhos desenvolvidos no seio do Instituto Superior Técnico, em Lisboa, da Faculdade de Engenharia (FEUP), no Porto e da Faculdade de Ciências e Tecnologia, em Coimbra. A Figura 1.1 ilustra o exemplo de duas obras actualmente em observação pelo Laboratório de Estruturas (LE) da FEUP.



a) Box-Culvert em Almodôvar;



b) Viaduto sobre a VCI, no Porto.

Figura 1.1 — Exemplo de duas obras actualmente em observação pelo LE.

Todas estas contribuições têm sido tão mais importantes, quanto mais vai crescendo a consciência nacional da importância e da necessidade do estudo do comportamento das estruturas pela via experimental. A este facto não será também alheia uma conjuntura social e económica, globalmente favorável a este tipo de intervenções, para a qual concorrem a quantidade de estruturas de dimensão apreciável que têm sido executadas, a maior acessibilidade aos sistemas de medição e os novos

conceitos emergentes de segurança e de durabilidade estrutural. Por outro lado tem-se verificado uma maior sensibilização a estas questões por parte das diversas entidades envolvidas na execução e na exploração de estruturas de engenharia civil, nomeadamente, donos da obra, promotores e construtores, promovendo ou sustentando eles próprios a aplicação de sistemas de monitorização estrutural.

1.3 OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Nos últimos anos tem-se assistido em Portugal ao aumento do volume de construção no domínio das Obras de Arte. Este aumento resulta não somente da construção de grandes estruturas como a Ponte Vasco da Gama, mas também de um elevado número de passagens desniveladas, de que são exemplo além das Pontes e dos Viadutos, as Passagens Superiores e as Passagens Inferiores. O material utilizado nestas realizações tem sido, preferencialmente, o betão. As actuais projecções e indicadores económicos apontam para que nos próximos anos o ritmo de construção não abrande, prevendo-se mesmo o seu aumento.

O presente trabalho pretende ser um contributo para o estudo dos sistemas de monitorização do comportamento de estruturas, com especial incidência nas estruturas de betão. O conhecimento das potencialidades e das limitações dos actuais sistemas de medição constitui uma base indispensável para a sua correcta aplicação a estruturas e para a conseqüente análise e interpretação do respectivo comportamento estrutural.

A divulgação das características dos actuais sistemas de monitorização estrutural constitui um importante passo para a sua difusão, mesmo em estruturas correntes, mas cujo comportamento tem denunciado um hiato de conhecimento, quer das questões relacionadas com a segurança, quer das questões referentes à sua durabilidade.

No capítulo 1 faz-se um enquadramento geral do trabalho, a sua inserção no contexto nacional e os principais objectivos que são perseguidos.

O capítulo 2 é dedicado à descrição geral dos sistemas de monitorização das estruturas, dando-se especial ênfase aos objectivos, às fases de intervenção na obra e à interpretação da medição.

Com o capítulo 3 pretende introduzir-se os conceitos e a terminologia associados à metrologia e à caracterização dos instrumentos de medição, sendo feita uma descrição genérica dos transdutores eléctricos e uma breve referência aos sensores de fibra óptica.

Segue-se depois um conjunto de capítulos dedicados à medição das grandezas mais correntemente observadas em estruturas, procedendo-se a uma descrição dos diversos instrumentos de medição que podem ser usados, os princípios de funcionamento que lhe estão associados, as principais

características de medição e a possibilidade de integração em sistemas de monitorização estrutural. Com este esqueleto, o capítulo 4 é devotado à medição do deslocamento, o capítulo 5 à medição da extensão, o capítulo 6 à medição da temperatura, o capítulo 7 à medição da pressão e o capítulo 8 à medição da inclinação. A monitorização de estruturas não se esgota na medição destas grandezas. A sua selecção e integração na presente dissertação está relacionada com os trabalhos de monitorização que têm vindo a ser desenvolvidos no Laboratório de Estruturas, adiante referidos.

O advento dos sensores de fibra óptica, e em particular dos sensores de Bragg, com características muito particulares de funcionamento, justifica a sua inclusão no capítulo 9, exclusivamente a eles dedicado.

Apresenta-se no capítulo 10 a aplicação pelo autor de sistemas de monitorização a estruturas de betão armado e pré-esforçado, descrevendo-se para cada caso o sistema adoptado. Para algumas dessas aplicações é ainda apresentada uma interpretação sumária dos valores medidos.

A encerrar a presente dissertação, exemplifica-se no capítulo 11 como pode evoluir a interpretação do comportamento estrutural a partir da medição efectuada em obra, recorrendo-se para o efeito a um dos exemplos apresentados no capítulo anterior.

Todos os testes, trabalhos e intervenções em obra descritos ao longo da presente dissertação conduzidos pelo autor, tiveram lugar no âmbito da colaboração que tem vindo a desenvolver no seio do Laboratório de Estruturas da FEUP.

CAPÍTULO 2

A MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

2.1 OBJECTIVO DA MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

De um modo geral pode afirmar-se que a monitorização de estruturas permite acompanhar o seu comportamento durante as fases de construção, exploração ou em situações de acidente. Com base na interpretação das medições realizadas é possível detectar avarias estruturais e prever eventuais situações de colapso, aumentando deste modo a vida útil da obra (Pedro, 1997).

Nas estruturas em que haja necessidade de proceder a intervenções de reparação, de reabilitação ou de reforço, o sistema de monitorização já instalado, ou a instalação de um especificamente para o efeito, pode fornecer dados essenciais, indispensáveis à elaboração do projecto respectivo. A observação estrutural, após qualquer uma destas intervenções, pode então ser usada com o objectivo de se analisar a eficiência das soluções adoptadas.

Por outro lado, o desenvolvimento e a aplicação em obra de novos materiais e de novas técnicas construtivas, é sustentado em boa parte, pela observação estrutural. Neste caso, os parâmetros que se procura quantificar dizem essencialmente respeito à sua durabilidade, e aos efeitos dos fenómenos reológicos no comportamento da estrutura.

Estão hoje disponíveis modelos numéricos de análise estrutural, capazes de simular o faseamento construtivo, o comportamento não linear dos materiais, a evolução das características de resistência e de deformabilidade e as propriedades reológicas dos materiais.

Estes modelos numéricos obrigam, contudo, à definição de um elevado número de parâmetros. O processo mais correcto para a obtenção de tais parâmetros, é através da análise experimental. A

monitorização estrutural fornece um conjunto ímpar de valores, por longos períodos de tempo, essenciais à sua definição.

Os modelos numéricos de análise estrutural, desde que devidamente testados e calibrados, complementam os resultados experimentais e são indispensáveis na previsão do comportamento da estrutura quando sujeita a outras situações difíceis ou impossíveis de simular em obra (Bastos, 1997).

Foi já referido o interesse da observação do comportamento das estruturas. Contudo, a decisão sobre a sua instrumentação resulta de um conjunto diverso de factores, de entre os quais se destaca (Rocha et al., 1955):

- a) Os objectivos e a organização das diversas entidades envolvidas, nomeadamente, projectistas, construtores, proprietários ou donos da obra e outras autoridades;
- b) As dificuldades na medição das grandezas que interessam à engenharia civil, e a sua correcta interpretação;
- c) Por fim, os custos envolvidos.

Os projectistas têm interesse em comparar os cálculos com o comportamento da estrutura, mas geralmente não têm preparação específica nem os meios económicos para suportar a observação; Os construtores e os donos da obra, apenas estão interessados que a estrutura sirva os objectivos para os quais foi construída, independentemente de estarem ou não de acordo os cálculos com o seu comportamento observado no local. As autoridades que verificam posteriormente a segurança da estrutura satisfazem-se, em geral, com uma cuidada inspecção visual, durante o primeiro período de vida da estrutura e, em casos de maior responsabilidade, com os chamados ensaios de carga estáticos, para os quais bastará, em geral, medir deslocamentos de pontos seleccionados da estrutura quando esta é solicitada por cargas conhecidas.

As dificuldades associadas à medição, decorrentes muitas vezes das condições que se vivem na obra, em especial durante a construção e as dificuldades inerentes à adequada interpretação dos resultados conduzem, frequentemente, a uma mera interpretação qualitativa dos resultados, provocando o alheamento das diversas entidades interessadas.

Contudo, estas dificuldades têm sido ultrapassadas, com resultados muito positivos, bem expressos nas numerosas publicações que sobre o assunto se vem publicando.

A observação das estruturas inclui, geralmente, os seguintes passos (Rocha, Borges e Marecos, 1955):

- a) Elaboração de um plano de observação;

- b) Selecção dos instrumentos de medida e sua calibração;
- c) Instalação dos instrumentos de medida em obra;
- d) Estudo das propriedades dos materiais relevantes para a interpretação dos resultados das medições;
- e) Observação durante a construção;
- f) Observação durante o ensaio de carga;
- g) Observações periódicas em serviço;
- h) Interpretação dos resultados das observações, análise da estrutura e conclusões para futuras construções.

2.2 FASES DE INTERVENÇÃO

2.2.1 Introdução

A monitorização estrutural é um conceito que deve estar presente durante as diversas fases da vida de uma estrutura (Pedro, 1997). Especialmente nas estruturas de maior dimensão ou, simplesmente, as de maior complexidade. Esta intervenção assume diferentes perspectivas, que vão desde a fase de concepção da estrutura, ou de projecto, até à fase final de exploração, passando pela sua construção.

A decisão atempada e programada acerca da oportunidade de monitorizar o comportamento de uma estrutura, a selecção criteriosa dos parâmetros a medir e uma intervenção programada na obra são pontos chave para o sucesso da observação do comportamento estrutural.

2.2.2 Projecto

A decisão sobre a necessidade e o interesse em monitorizar uma dada estrutura deve ser feita durante a fase de projecto. Caso se opte pela sua monitorização, a estrutura deve ser preparada para receber o sistema de monitorização considerado mais adequado. Um aspecto fundamental que é necessário ter em conta nesta fase prende-se com as acessibilidades (Santos e Brito, 2000). É conveniente prever durante a fase de projecto o acesso às secções dos elementos onde são instalados os sensores e aos locais onde é indispensável aceder para uma simples inspecção visual. Nomeadamente, deve estar garantido o acesso aos aparelhos de apoio ou às juntas de dilatação de uma ponte, ao interior de um tabuleiro em caixão ou ao interior de um pilar de secção vazada.

O sistema de monitorização é por vezes uma premissa do projecto, na medida em que o projectista toma opções baseadas num conjunto de hipóteses que espera ver confirmadas aquando da execução da obra através do sistema de monitorização. A observação das medições feitas em obra pode conduzir a que sejam propostas correcções ao projecto. A não existência de um sistema de monitorização que acompanhe a construção, pode conduzir o projectista a optar por soluções estruturais correntes, cujo comportamento seja já conhecido, ou a adoptar procedimentos conservativos.

Conhecedor do funcionamento expectável da estrutura, ciente das questões que pretende ver esclarecidas, é ao projectista que cabe, em geral, propor as secções a instrumentar, as grandezas a medir, o número e a localização de sensores na secção e a frequência com que as medições devem ser realizadas. A selecção das secções a instrumentar deve ser feita por se considerar:

- a) serem críticas, ou seja, por se prever que venham a estar sujeitas a esforços máximos, numa ou mais fases da vida da obra;
- b) tratar-se de secções, que por serem correntes, exemplificam bem o comportamento da generalidade das secções.

2.2.3 Execução ou construção

Durante a construção, a estrutura vai sofrendo alterações permanentes da geometria, das propriedades resistentes e de deformabilidade dos materiais e das acções aplicadas. A observação do comportamento da estrutura desde a construção e a elaboração dos respectivos Relatórios de Observação Periódica, fornecem informações importantes, que servem de base à interpretação das grandezas medidas e permitem compreender melhor o comportamento estrutural após a construção.

2.2.4 Final da obra

Do ponto de vista da observação o comportamento final da estrutura o final da obra corresponde a uma fase muito importante, sobretudo se incluir a realização de ensaios de carga estáticos de recepção. Nos ensaios de carga a estrutura é sujeita, pela primeira vez, a acções com características idênticas às que vai experimentar durante a fase exploração e para as quais foi projectada. É nesta fase que são feitas as medições com vista à elaboração dos Relatórios Finais onde são tecidas considerações acerca do comportamento da estrutura.

2.2.5 Exploração

A fase de exploração corresponde à vida útil da estrutura após a execução, em que se procede à sua utilização de acordo com o previsto no projecto.

Do ponto de vista da observação da estrutura, a fase de exploração divide-se, em geral, em duas etapas. A primeira delas, logo após a construção, e durante os primeiros anos, em que nas campanhas de inspecção se continua a fazer registo das leituras dos sensores instalados na estrutura aquando da construção. Na segunda fase, procede-se a campanhas de inspecção e manutenção da estrutura. De cada uma destas campanhas deverá resultar a elaboração do respectivo Relatório de Observação Periódica.

Este procedimento resulta, por um lado, do facto de os sensores actualmente instalados em obra terem um período de vida reduzido quando comparado com a vida útil da estrutura. Por outro lado, julga-se que uma boa caracterização estrutural, baseada no seu comportamento durante a construção e ao longo dos primeiros anos de vida é suficiente, sendo possível estimar com confiança a sua durabilidade.

As campanhas de inspecção e manutenção, feitas nos anos subsequentes, baseadas fundamentalmente na observação visual directa, deverão ter em conta as considerações e as recomendações constantes do Relatório Final e dos Relatórios de Observação Periódica elaborados até à data. Estão actualmente em desenvolvimento metodologias para a condução destas campanhas de inspecção com vista à sua sistematização e normalização na elaboração dos respectivos relatórios (Brito e Branco, 1994 e Brito, Santos e Branco, 2002).

As campanhas de inspecção e manutenção não se limitam apenas à observação da superestrutura, mas também de todos os dispositivos e órgãos secundários que esta contém que asseguram o funcionamento da estrutura em serviço.

2.2.6 Situação de acidente

Numa situação de acidente a estrutura é sujeita a acções que podem ou não ter sido previstas no projecto. A adopção de sistemas de monitorização que incorporem sistemas de alarme pode nestas situações ser vantajosa. Uma das vantagens é a de permitir a activação imediata de sensores para medir parâmetros predefinidos. O registo do comportamento estrutural durante uma situação de acidente, sendo raro, constitui uma informação de inestimável importância.

2.2.7 Reparação, reabilitação e reforço

Reparação, reabilitação e reforço são fases de intervenção na estrutura, posteriores a uma primeira fase de exploração, que podem ter objectivos bem diversos, mas que se destinam essencialmente a prolongar a fase de exploração, adaptar a estrutura a novas situações de acções ou de utilização ou simplesmente restituir ou melhorar as características de segurança e de durabilidade encontradas no final da construção. A utilização de um sistema de monitorização permitirá prever e programar atempadamente qualquer uma destas intervenções. O sistema de monitorização pode fornecer

informação importante ao projecto de intervenção na estrutura e ainda observar o efeito dessa mesma intervenção.

2.3 GRANDEZAS A MEDIR

A observação do comportamento estrutural inclui a realização de um conjunto de medições, em secções e pontos predefinidos, e a condução de ensaios, em obra e em laboratório, com vista à correcta interpretação dos valores obtidos em obra.

No desenvolvimento e aplicação de um plano de monitorização devem ser medidas as grandezas relevantes à definição do comportamento da estrutura. A definição dessas grandezas está, naturalmente, relacionada com os objectivos da monitorização da estrutura em causa.

A definição das grandezas a medir só pode ser feita para cada caso em particular. Dependerá do tipo e da dimensão da estrutura, dos materiais que a constituem, se a estrutura é existente ou a construir. Nas situações em que se pretenda observar a construção é necessário ter em consideração o faseamento construtivo proposto.

Na observação das estruturas de betão, fundamentalmente, interessa medir:

- a) Deslocamentos lineares;
- b) Desvios angulares;
- c) Extensões;
- d) Pressões;
- e) Temperaturas;
- f) Abertura das fendas.

A medição dos deslocamentos é um processo corrente de controlar a execução da obra. Na execução de grandes obras é feita com frequência com recurso a técnicas topográficas, embora outras técnicas, com base em raios laser, estejam também desenvolvidas. Estas técnicas são usadas, por exemplo, na medição das flechas de tabuleiros de viadutos. A medição de deslocamentos pode ser também um processo de medir extensões. Neste caso são usados os transdutores de deslocamento. Estes transdutores são também usados, por exemplo, na medição da abertura de fendas das estruturas de betão, na medição da largura das juntas de retracção ou de juntas de dilatação.

Os instrumentos de medida destinados a medir desvios angulares são os clinómetros e os inclinómetros. Na monitorização das estruturas são usados para medir a rotação de secções, por exemplo, do tabuleiro de uma ponte ou de um mastro numa ponte atirantada.

A obtenção experimental dos esforços em determinadas secções é feita com base nas extensões medidas em pontos criteriosamente seleccionados dessas mesmas secções. Os sensores que medem extensões são designados extensómetros. Uma vez que os extensómetros medem as extensões totais que se verificam nesses pontos, no caso das estruturas de betão, como adiante se verá, existem técnicas que permitem seleccionar de entre estas, as extensões que provocam tensões, não sendo contudo uma questão de fácil resolução. Nas estruturas de betão, estão desenvolvidos métodos que permitem estimar experimentalmente as parcelas da deformação que correspondem à retracção e as que correspondem à fluência do material.

A medição da temperatura é muito importante, não só porque esta altera as características de medição dos instrumentos, mas essencialmente porque quer a temperatura, quer a humidade, condicionam muito o estado de deformação das secções. A variação da temperatura ambiente ao longo do dia, associada à baixa condutibilidade térmica do betão, provoca uma distribuição não uniforme da temperatura nas secções. Este facto é muito agravado se houver lados das secções com diferente exposição solar. Daí que, para uma correcta interpretação das extensões medidas, seja conveniente o conhecimento da temperatura ambiente, da temperatura junto às faces e a distribuição da temperatura no interior das secções instrumentadas.

A medição de grandezas nas fundações, como deslocamentos, deformações ou pressões pode revelar-se de grande importância, e nem sempre é tida em conta. Sempre que possível, a instalação e a medição das grandezas seleccionadas deve ter início com a construção, podendo servir como teste de carga à fundação (Pedro, 1997).

As particularidades associadas à medição de cada uma destas grandezas, assim como as características e princípios de funcionamento de cada um dos sensores que lhe estão associados, serão adiante desenvolvidos.

A preocupação na definição das grandezas a medir não pode contudo desviar a atenção de uma tarefa fundamental incluída na observação estrutural. Trata-se da simples observação, ou inspecção visual da superfície dos elementos estruturais, ou dos equipamentos que lhe estão associados, que embora não sendo mensurável, fornece informação igualmente valiosa acerca do comportamento estrutural.

2.4 INTERPRETAÇÃO DAS MEDIÇÕES

Os resultados de uma medição realizada em obra são, em geral, de interpretação complexa. Existe em obra um conjunto de factores que podem afectar o valor medido, nomeadamente devido a factores que:

- a) afectam directamente o sistema de monitorização, como sejam a avaria dos sensores, o corte total ou parcial de cabos de ligação, a avaria ou falha do sistema de aquisição, a falha de corrente, corrente não estabilizada, ou com picos muito elevados de tensão, dificuldades de comunicação no caso de ligação em rede;
- b) alteram as características de medição dos sensores, de que a temperatura é o melhor exemplo;
- c) alteram localmente o valor da extensão medida, como a temperatura e a humidade no caso do betão.

No caso de se tratar de uma estrutura de betão existe uma dificuldade adicional na interpretação das medições efectuadas, nomeadamente no que diz respeito às extensões, pois estão presentes fenómenos reológicos de difícil quantificação, como a retracção e a fluência.

Para o estabelecimento da relação entre a tensão e a deformação do betão há que distinguir a deformação instantânea devida ao carregamento, da que se manifesta ao longo do tempo, designada por deformação diferida. Conhecido o valor da acção, a parcela imediata da deformação pode ser calculada a partir do módulo de elasticidade instantâneo do betão. A definição da parcela diferida, resultante da retracção e da fluência, é bem mais complexa e tem sido objecto de diversos estudos (Garcia, 1995). A quantidade de factores que afectam a parcela diferida da deformação, muitos deles relacionados com as condições que se verificam em obra, conduz ao interesse, e mesmo à necessidade, de se proceder à sua avaliação *in situ*.

A obtenção, em obra, de parâmetros definidores da retracção e da fluência do betão, tem sido feita pelo LNEC, com recurso à instalação de prismas compensadores, no interior dos quais são instalados extensómetros da mesma série dos instalados na estrutura a observar. As dimensões e técnicas de aplicação destes prismas têm sofrido alguma evolução, função essencialmente do tipo e dimensão das estruturas. Actualmente os sistemas aplicados em obra compreendem os prismas compensadores de retracção, de dimensões de 0,30m×0,30m×0,60m e os prismas compensadores da fluência, de dimensões de 0,30m×0,30m×0,72m.

O primeiro conjunto de prismas não é submetido a qualquer acção, pelo que a deformação acusada pelos extensómetros é devida, apenas, ao fenómeno da retracção. A Figura 2.1 apresenta dois prismas de retracção instalados em obra pelo LNEC. O fenómeno da retracção está relacionado com a espessura do elemento. Daí que a simulação nos prismas da espessura dos elementos estruturais

seja feita definindo uma fronteira em que não há trocas termohigrométricas com o exterior, processando-se estas apenas através das duas faces opostas de maior dimensão. Para isso nas restantes faces é colocada uma tela asfáltica, envolta com aglomerado negro de cortiça, logo após a desmoldagem dos prismas.



Figura 2.1 — Par de prismas de retracção instalado em obra.

O conjunto de prismas associado à medição da fluência é instalado num sistema que aplica uma carga de valor conhecido e com carácter permanente, medindo os extensómetros, neste caso, além da deformação devida à retracção, a devida à fluência. A deformação de fluência é obtida a partir da diferença entre os valores lidos nos prismas de retracção e nos prismas de fluência. A Figura 2.2 apresenta o equipamento de fluência utilizado em obra pelo LNEC, onde também se pode observar o isolamento termohigrométrico idêntico ao adoptado nos prismas de retracção.



Figura 2.2 — Sistema de fluência instalado em obra.

Dada a variabilidade do comportamento diferido do betão, quando observado in situ, têm sido propostas metodologias de análise, reunindo toda a informação que vai sendo acumulada na observação de diversas obras (Santos, Virtuoso e Fernandes, 2000).

Paralelamente, existe um conjunto de estudos laboratoriais que é necessário fazer que visam apoiar a interpretação dos resultados das leituras fornecidas pelos sensores instalados em obra. Os principais estudos prendem-se com a caracterização das propriedades do betão, nomeadamente:

- a) Propriedades de resistência: Em geral limita-se à obtenção dos valores de rotura à compressão de provetes cúbicos (em geral com 0,15m ou 0,20m de aresta) ou cilíndricos (com 0,15m de diâmetro e 0,30m de altura). Este ensaio deve ser conduzido de acordo com a Especificação LNEC E 226.
- b) Propriedades de deformabilidade: Procedem-se para o efeito à determinação do módulo de elasticidade momentâneo em compressão do betão de acordo com a Especificação LNEC E397. O LNEC utiliza frequentemente provetes prismáticos de secção quadrada, com 0,20m de aresta e 0,60m de altura e provetes cilíndricos com 0,20m de diâmetro e 0,60m de altura ou 0,30m de diâmetro e 0,90m de altura, respeitando todos eles portanto, a condição de a altura ser pelo menos 3 vezes a aresta ou o diâmetro.
- c) Retracção do betão: A determinação da retracção do betão em laboratório consta da Especificação LNEC E398. Os prismas devem possuir as mesmas formas e as mesmas dimensões que os utilizados na determinação do módulo de elasticidade. Devem executar-se pelo menos dois provetes para cada ensaio.
- d) Fluência do betão em compressão: A determinação da fluência em compressão do betão em laboratório consta da Especificação LNEC E399. Os prismas devem ter as mesmas dimensões dos adoptados para a retracção. São definidas duas condições diferentes de conservação dos provetes: uma com $50\pm 5\%$ de humidade relativa e $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, e outra em que não haja qualquer troca de humidade do provete com o exterior. Devem ser executados pelo menos dois provetes para cada condição de conservação.

Recorre-se também, por vezes, à realização de ensaios de estruturas construídas em escala reduzida, se bem que devido ao seu custo cada vez mais elevado se tornem muitas vezes proibitivos.

2.5 SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

Os sistemas de monitorização de estruturas que têm vindo a ser desenvolvidos nos países mais desenvolvidos têm como objectivo a garantia da vida útil e a funcionalidade das obras, optimizando os recursos financeiros despendidos em manutenção. Na realidade, o custo de uma obra não é

apenas o custo da sua construção, mas sim a integração deste com o custo da sua manutenção e de eventuais intervenções estruturais posteriores. Nesta perspectiva devem ser adoptados sistemas de monitorização que contemplem as componentes de durabilidade e de segurança estrutural, que à luz das novas metodologias, e de acordo com a experiência (Rocha et al., 1955), devem contemplar as fases de projecto, de construção e de exploração, durante a vida útil da obra.

Actualmente os sistemas de monitorização são sistemas constituídos por microprocessadores e computadores, permitem a aquisição, o armazenamento e a análise dos dados, obtidos a partir dos sensores instalados em obra (Kenley, 1997). Estes sistemas têm experimentado um enorme desenvolvimento, especialmente no que diz respeito à qualidade da medição, à frequência de aquisição e à capacidade de armazenamento de informação, a custos cada vez mais razoáveis.

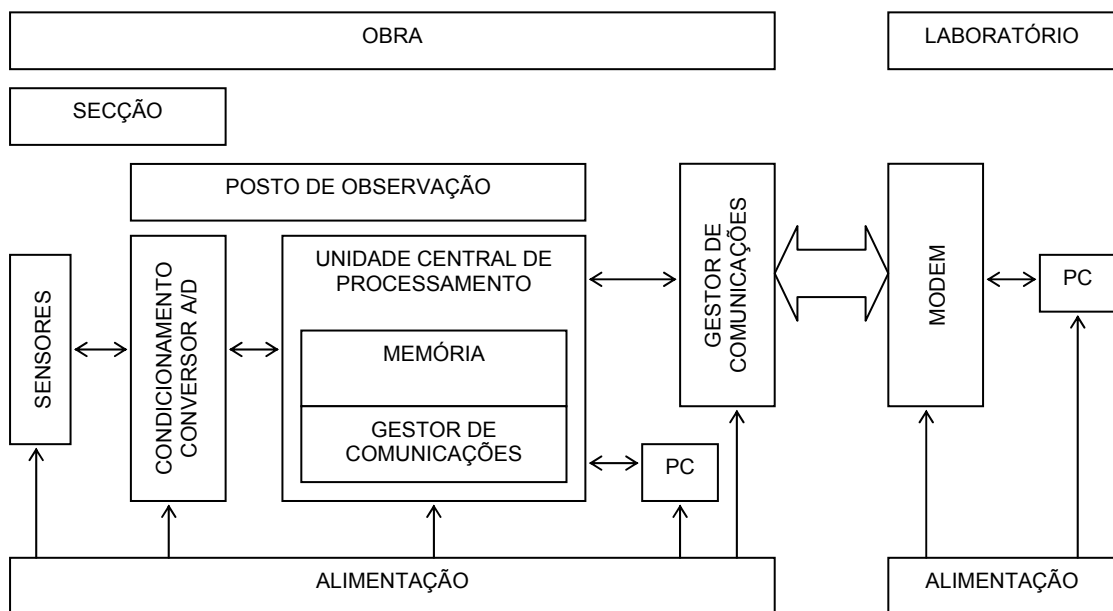


Figura 2.3 — Esquema geral de um sistema de monitorização.

A Figura 2.3 apresenta o esquema geral de um sistema de monitorização a aplicar na observação do comportamento de uma estrutura. Junto de cada secção instrumentada, ou junto de cada conjunto de secções instrumentadas, são dispostas estações ou postos de observação, com funcionamento autónomo, e aos quais estão ligados os sensores dessa ou dessas secções. Estes postos de observação são, em geral, constituídos por sistemas de condicionamento e de conversão de sinal, e uma unidade central de processamento, dotada de um gestor de comunicações e de memória para o armazenamento da informação. Por vezes, o condicionamento de sinal e a sua conversão é efectuado, não no posto de observação, mas junto dos próprios sensores. Este procedimento é

adoptado com o objectivo de reduzir as perdas de sinal ao longo dos fios condutores, quando este é de valor muito pequeno.

A unidade central de processamento é programável e faz a gestão da informação sendo dotada de memória e de um gestor de comunicações. A memória armazena não só os valores medidos como também toda a informação relativa ao processo de medição. O gestor de comunicações permite ao utilizador aceder à informação acumulada e armazenar a informação relativa ao processo de medição. O acesso pode ser feito localmente através de um computador pessoal ligado directamente à unidade, ou remotamente através de uma rede exterior de comunicações. A Figura 2.4 exemplifica um posto de observação instalado em obra, no interior de uma caixa de protecção ambiental, durante a fase de instalação. Neste caso está a ser utilizado um portátil para o estabelecimento da comunicação com o sistema que vai permanecer em obra.

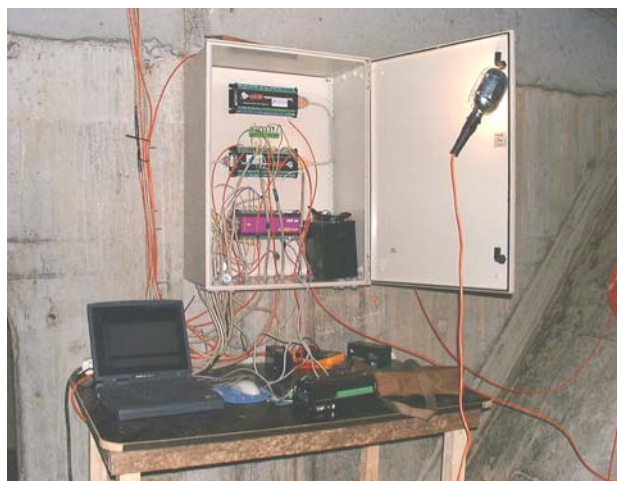


Figura 2.4 — Exemplo de um posto de observação instalado em obra.

O acesso remoto pode ser feito através de um gestor de comunicações, exterior à unidade central que, controlando o funcionamento desta, é capaz de estabelecer comunicações com o exterior, nas situações previamente definidas. Nomeadamente, em situações de alarme, ou porque os valores resultantes da medição excederam determinados limites, ou porque foi detectado algum mau funcionamento da unidade.

A Figura 2.5, que apresenta uma aplicação do esquema geral apresentado anteriormente, evidencia a articulação existente entre os diversos postos de observação que podem ser instalados em obra. Nesta solução, os postos de observação estão ligados entre si através de uma rede local, sendo possível controlar a partir de um deles o funcionamento dos restantes. É também através deste posto, designado no esquema por posto central de observação, que se acede ao sistema por via remota.

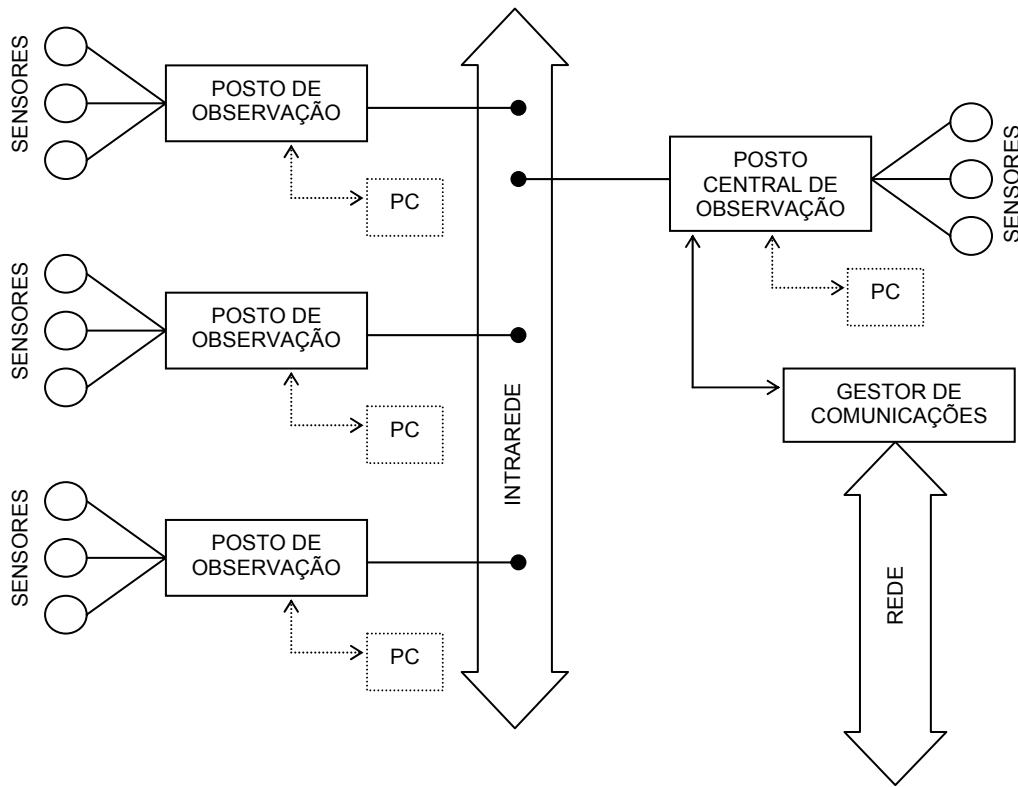
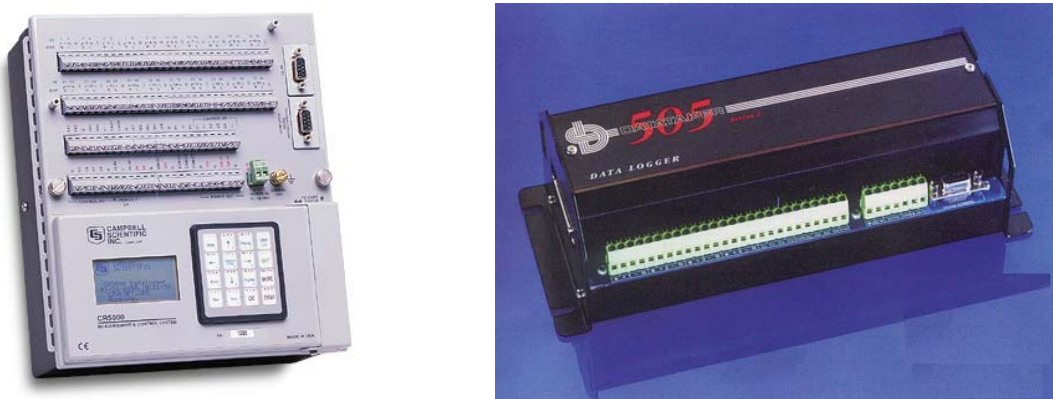


Figura 2.5 — Configuração de um sistema de monitorização.

Em sistemas mais evoluídos será possível, em obra ou em laboratório, fazer uma primeira análise automática aos resultados das medições, efectuando, por exemplo, uma primeira estimativa do valor dos esforços numa dada secção. Nestes programas de análise automática são introduzidos os parâmetros definidores das propriedades dos materiais, obtidos em obra, em laboratório, ou simplesmente estimados a partir de curvas regulamentares previsíveis do seu comportamento. Estes sistemas automáticos de análise de resultados carecem, contudo, da possibilidade de fazer uma análise qualitativa dos resultados, contemplando todas as ocorrências em obra que podem afectar as leituras, e dificilmente farão uma análise global do problema. Apenas a conjugação de uma análise muito cuidada dos valores medidos com o conhecimento profundo do comportamento expectável para a estrutura e uma larga experiência na observação do comportamento estrutural, permitirão tecer considerações fiáveis acerca do comportamento da estrutura.

Uma das possibilidades, e das grandes vantagens, dos sistemas automáticos de aquisição é a possibilidade de aquisição de sinal com intervalos de tempo predefinidos pelo utilizador, permitindo obter a evolução no tempo da grandeza medida. Esta informação, articulada com o historial da própria obra — acções, condições climatéricas, etc. — é de interesse fundamental para a interpretação dos resultados.

A Figura 2.6 apresenta dois exemplos de sistemas de aquisição, especialmente desenvolvidos para integrar sistemas de monitorização em estruturas de engenharia civil. São dispositivos de funcionamento autónomo, que reconhecem os sensores mais comuns, armazenam os dados provenientes das medições, e podem executar um primeiro tratamento da informação. Na execução das tarefas correntes para as quais foram programados não estão dependentes da permanência de um computador em obra. A necessidade de ligação a um computador limita-se às operações de configuração do equipamento, de acesso às medições, quer em tempo real, quer aos valores entretanto armazenados, e ao tratamento e processamento complementares da informação.



a) Modelo CR5000 da Campbell Scientific, Inc.. b) Modelo DT505 da Data Electronics, Inc..

Figura 2.6 — Equipamento de aquisição de sinal.

2.6 DEFICIÊNCIAS EM SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

A intervenção numa obra não se esgota na instalação dos sensores e do equipamento de aquisição e na realização das respectivas ligações. Um aspecto que assume particular importância é o acompanhamento permanente de todas as fases de construção por parte das diversas entidades intervenientes, nomeadamente, além dos técnicos responsáveis pela instalação, da Fiscalização, do Dono da Obra, do Projectista e do Empreiteiro. De entre as diversas entidades envolvidas, a equipa técnica, especialmente vocacionada para a monitorização de estruturas, apenas se destaca porque tem uma sensibilidade diferente para os problemas que podem afectar a qualidade das medições que se pretendem realizar.

As principais deficiências que podem ser detectadas numa instalação, reunidas em três fases distintas da vida da estrutura, estão resumidas no Quadro 2.1. Nem sempre é possível reparar as deficiências detectadas numa dada instalação, mas a informação de que essa instalação está deficiente é essencial para a interpretação dos resultados do conjunto de sensores.

Quadro 2.1 — Principais deficiências na instalação de sensores de embeber no betão.

Fases da vida da estrutura		Deficiência	Causa mais frequente
Execução	Antes da betonagem.	Posicionamento do sensor.	Erro no fornecimento das cotas que definem a localização do sensor.
		Alteração do posicionamento do sensor; Danos no sensor; Danos no cabo.	Movimentação do pessoal, de equipamento, e de materiais, nomeadamente, colocação das armaduras activas e passivas, da cofragem, espaçadores, etc.
	Durante a betonagem.	Alteração do posicionamento do sensor; Danos no sensor; Danos no cabo.	Movimentação do pessoal e do equipamento associado à betonagem.
	Após a betonagem.	Danos no cabo.	Retirada da cofragem na zona de saída do cabo condutor; Trabalhos na zona onde o cabo é exterior à estrutura.
Exploração		Danos no cabo; Danos no sistema de aquisição.	Envelhecimento dos materiais; Agressividade do meio ambiente; Actos de vandalismo.

Nas situações em que não chega nenhum sinal do sensor ao sistema de aquisição, o diagnóstico é simples e o sensor é simplesmente retirado do sistema de monitorização, deixando de ser considerado na interpretação dos resultados. Nas situações mais complexas, a deficiência do sistema de monitorização não impede que continuem a ser obtidos valores de medição. O desconhecimento da existência de uma avaria na instalação pode conduzir a interpretações erradas dos valores medidos.

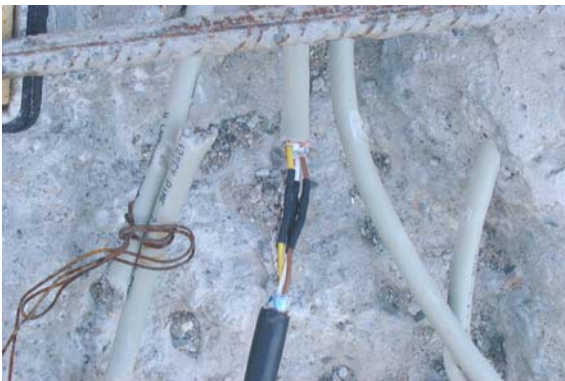
Apresenta-se na Figura 2.7 um exemplo de uma falha de instalação, detectada numa dada secção onde foram instalados quatro extensómetros de resistência de embeber no betão. Operações de desmonte do betão na zona em que os cabos condutores passavam para o exterior da secção, provocaram o corte de dois deles e danificaram um terceiro. Os operários, que na altura procediam ao desmonte do betão, fizeram a associação dos cabos integralmente seccionados, atando-os com um arame, e aguardaram a intervenção do técnico responsável pela instalação. Não obstante as

garantias dadas em obra de que a identificação dos cabos foi a correcta, a dúvida deverá permanecer, pelo menos, até à interpretação das medições. Só o conhecimento de uma eventual troca na identificação dos sensores pode já ser de grande importância, nessa fase posterior de interpretação dos resultados.



Figura 2.7 — Cabos danificados em obra.

A Figura 2.8 apresenta uma fase intermédia da operação de emenda dos cabos e o aspecto final, após a reparação.



a) Durante a reparação



b) Após a reparação

Figura 2.8 — Emenda por soldadura dos cabos condutores e respectiva protecção.

2.7 ESTRUTURAS INTELIGENTES

O conceito de estrutura inteligente pressupõe a existência de sistemas automáticos de monitorização, de estruturas auto-adaptativas e de um sistema inteligente de gestão da estrutura.

O sistema automático de monitorização deverá ser capaz de detectar se ocorreu uma situação de excepção predefinida, por exemplo através do controlo de determinados valores dos efeitos das acções. Procederá então a uma rotina diferente, consoante os valores dos parâmetros adquiridos, que poderá incluir, por exemplo, uma maior frequência de leituras, a leitura de sensores específicos pré-determinados, que não são lidos em situações correntes, a transmissão de mensagens de aviso para o exterior via correio electrónico para um gabinete de apoio à obra, para um laboratório, ou mesmo para o Serviço de Protecção Civil.

Neste contexto entende-se por estruturas auto-adaptativas aquelas que são capazes de alterar as acções a que estão sujeitas, as suas condições de apoio ou mesmo a sua geometria, através de sistemas mais ou menos complexos. Refira-se, por exemplo, que a redução de sobrecarga a que uma ponte está sujeita pode ser conseguida através da interdição ao tráfego da mesma. Isso pode ser conseguido simplesmente através da introdução de um dispositivo luminoso de sinalização vertical ou da instalação de barreiras automáticas. Sistemas mais complexos podem incluir por exemplo a aplicação de cargas ascendentes à estrutura através do tensionamento automático de cabos de pré-esforço especificamente instalados para o efeito.

Completa este esquema um sistema inteligente de gestão da estrutura, capaz de interpretar em tempo real a informação transmitida pelo sistema de monitorização e de a traduzir em medidas correctivas sobre a estrutura.

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

O processo de medição constitui, na essência, o primeiro objectivo da aplicação de um sistema de monitorização. O conhecimento deste processo é de grande importância quer na selecção do método e dos instrumentos de medição, quer na interpretação dos valores medidos.

A metrologia é a ciência que estuda a medição de grandezas físicas, os sistemas de unidades, os instrumentos, os métodos e as técnicas de medição (Campilho, 2000). À semelhança de outras ciências, utiliza uma terminologia própria, constante da versão portuguesa do Vocabulário Internacional de Metrologia (1996). São resumidos neste capítulo os aspectos essenciais desta terminologia, com especial relevo para a caracterização geral dos instrumentos de medição. Os aspectos particulares de cada um dos instrumentos de medição mais utilizados na monitorização de estruturas serão tratados em capítulos especialmente dedicados à medição de cada uma das grandezas respectivas.

Os transdutores eléctricos são instrumentos de medição em que o sinal de saída é eléctrico, função da grandeza que se pretende medir. Sendo estes instrumentos de medição os mais usados nos actuais sistemas de monitorização, refere-se no presente capítulo o conceito de condicionamento de sinal a eles associado.

3.2 METROLOGIA

3.2.1 Grandezas e unidades

Para assegurar uma comunicação precisa entre as pessoas que usam disciplinas técnicas é adoptado um conjunto de unidades métricas aprovado em conferência internacional (Conferência Geral de Pesos e Medidas), chamado Sistema Internacional de Unidades (SI). Este sistema foi adoptado em Portugal através dos Decreto-Lei 427/83, de 7 de Dezembro e D. L. 320/84, de 1 de Outubro. No SI distinguem-se as grandezas de base ou fundamentais e as grandezas derivadas. No primeiro grupo incluem-se as grandezas aceites por convenção como sendo funcionalmente independentes umas das outras, enquanto que no segundo grupo as grandezas são definidas como função das grandezas de base (Restivo, 1995).

As unidades fundamentais que estão em correspondência com as grandezas de base são o comprimento, a massa, o tempo, a intensidade de corrente eléctrica, a temperatura, a intensidade luminosa, a quantidade de matéria, o ângulo plano e o ângulo sólido.

Todas as outras unidades do SI derivam destas, embora nalguns casos tenham nomes especiais. São as unidades derivadas e estão em correspondências com as grandezas derivadas. Alguns exemplos de unidades derivadas são a força, a pressão, a resistência eléctrica e a tensão eléctrica.

O Quadro 3.1 resume as unidades derivadas mais frequentes.

Quadro 3.1 — Exemplos de unidades derivadas do SI.

Grandeza		Unidade		
Nome	Símbolo	Nome	Símbolo	Definição
Frequência	f	hertz	Hz	s ⁻¹
Força	F	newton	N	kg×m/s ²
Resistência	R	ohm	Ω	kg×m ² /(s ³ ×A ²)
Tensão	V	volt	V	A×Ω
Pressão	P	pascal	Pa	N/m ²
Frequência angular	ω	radianos por segundo	rad/s	rad/s
Capacidade	C	faraday	F	s ⁴ ×A ² /kg×m ²
Condutância	G	siemens	S	Ω ⁻¹

3.2.2 Múltiplos e submúltiplos

Dada a grande gama de valores das variáveis, há a necessidade de utilização de números grandes e pequenos. A notação científica permite exprimir estes números em potências de base 10. A IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) adoptou um conjunto de prefixos métricos cujas designações dos múltiplos e submúltiplos do SI estão indicados no .

Quadro 3.2.

Quadro 3.2 — Múltiplos e submúltiplos do SI.

Múltiplo	Prefixo SI	Símbolo
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	quilo	k
10^2	hecto	h
10	deca	da
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	fento	f
10^{-18}	ato	a

3.2.3 Metrologia

Designa-se por metrologia o domínio dos conhecimentos relativos à medição, sendo a medição a transdução de uma grandeza num correspondente analógico da variável física que pode ser, entre

outros, uma pressão, uma tensão ou uma corrente eléctrica. Os termos utilizados para designar os dispositivos destinados à execução de uma medição são numerosos. A sua ordenação por ordem de complexidade crescente é (Campilho, 2000): componente, parte, transdutor, dispositivo, material de referência, medida materializada, instrumento, aparelho, equipamento, cadeia de medição, sistema de medição e instalação de medição. Na área da engenharia civil o termo transdutor é utilizado para designar genericamente um instrumento de medição.

Os transdutores efectuam a medição inicial e fazem a conversão de energia da grandeza física a medir numa informação analógica, mecânica ou eléctrica. Podem ser necessárias transformações posteriores, de que o condicionamento de sinal é um exemplo, para completar a função de medição. Com o desenvolvimento da electrónica na área da instrumentação e da linguagem a ela associada, tem também vindo a ser aplicado o termo sensor para designar instrumento de medição.

Processo de medida ou medição é o conjunto de procedimentos a partir dos quais se obtém a grandeza mensurada (Campilho, 2000). Deve incluir toda a informação relativa à obtenção de uma medição, nomeadamente o conjunto de operações envolvidas na medição, os métodos e os princípios em que se baseia.

Qualquer processo de medida deve garantir imunidade à influência nefasta de grandezas perturbadoras que podem alterar o valor da grandeza a medir ou as características dos instrumentos utilizados na medição. A temperatura, a humidade, os campos electromagnéticos são exemplos de grandezas que podem ser perturbadoras.

3.2.4 Métodos de medição

Os métodos utilizados na medição de uma grandeza podem ser classificados em métodos directos e métodos indirectos. No método directo, o valor da grandeza a medir é obtido por indicação ou leitura do aparelho utilizado de que é exemplo a medição de um comprimento com o auxílio de uma régua graduada. No método indirecto, o valor da grandeza a medir é obtido como resultado da medição de uma ou mais grandezas funcionalmente relacionadas com aquela; é o caso da medição da temperatura através da medição de um comprimento num termómetro de mercúrio.

Uma outra classificação possível de métodos utilizados na medição são (Freitas, 1988):

- a) Método de medição fundamental — por medida das grandezas base apropriadas;
- b) Método de medição segundo a definição — apelando à definição da grandeza;
- c) Método de medição por comparação directa — comparando com uma grandeza da mesma natureza e de valor conhecido;

- d) Método de medição por substituição — sujeitando o aparelho indicador alternadamente ao valor da grandeza medida e a uma de valor conhecido;
- e) Método de medição diferencial — por exemplo, quando se utilizam blocos padrão e um comparador;
- f) Método de medição por zero — por exemplo, quando se recorre a uma ponte de Wheatstone.

3.2.5 Erro de medição

Ao resultado da medição de uma grandeza encontra-se inevitavelmente associado um erro de medição que representa o conjunto das incertezas do processo de medida. Distinguem-se dois tipos de erro:

- a) Erro de medição ou erro absoluto — definido como a diferença algébrica entre o resultado da medição e o valor verdadeiro da grandeza submetida à medição;
- b) Erro relativo — dado pelo quociente do erro absoluto pelo valor verdadeiro da grandeza submetida à medição.

Os erros podem ter diversas origens e são geralmente classificados como:

- a) Erros aleatórios — erros que variam de uma forma imprevisível, em várias medições da mesma grandeza. Estão presentes em todas as medições e são devidos a limitações dos aparelhos ou a razões desconhecidas ou indeterminadas; são exemplo, o ruído eléctrico intrínseco aos componentes e instrumentos utilizados na medição, ou variação não detectada das condições ambientais de medição; a minimização destes erros pode ser conseguida com recurso à estatística, desde que se efectue um conjunto significativo de medições à mesma grandeza;
- b) Erros sistemáticos — componentes do erro da medição que se mantêm constante ou de forma previsível durante várias medições da mesma grandeza; são, por exemplo, devidos a erros fixos do instrumento ou a erros sistemáticos de leitura do operador; este tipo de erros pode ser eliminado por calibração.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

3.3.1 Instrumentos de medição

Conforme foi referido, instrumento de medição é um dispositivo destinado à execução da medição. O conjunto de instrumentos de medição e de outros dispositivos montados para efectuar uma medição específica designa-se por sistema de medição. Deste modo a medição pode ser obtida directamente a partir do instrumento de medição, ou através de um sistema de medição, que trata o sinal do instrumento de medida, apresentando como resultado final o valor da grandeza a medir. Um sistema de medição programável, onde as medições são feitas automaticamente, na observância de um plano pré-definido com capacidade de guardar informação, constitui um sistema de monitorização. Quando estes sistemas são dotados de capacidade de decisão podem ser classificados como sistemas inteligentes de monitorização.

Os transdutores podem ser mecânicos, eléctricos, electromecânicos, pneumáticos ou ópticos. O termo sensor está em geral associado aos transdutores eléctricos. Os transdutores mais utilizados na área das estruturas continuam a ser os mecânicos e os eléctricos.

3.3.2 Características dos instrumentos de medição

O valor apresentado como resultado de um processo de medição — valor medido — corresponde ao valor detectado por um determinado instrumento de medição, em determinadas condições de medição. O valor medido deve-se aproximar tanto quanto possível do valor exacto da grandeza medida, sendo certo que este dificilmente é encontrado.

Para o sucesso de um processo de medição, para além das condições em que este se realiza, convergem essencialmente dois factores. Por um lado, a selecção do instrumento para o fim em vista, por outro, a avaliação qualitativa e quantitativa dos valores apresentados como resultado da medição. O conhecimento das características dos instrumentos de medição desempenha, quer num quer noutro, um papel fundamental. Estas características têm uma terminologia muito própria e são definidas com base num conjunto de conceitos que a seguir se resumem (Freitas, 1988).

Ampliação ou *ganho* — Ampliação é a relação existente entre o valor apresentado pelo instrumento de medição, correspondente à diferença entre o valor inicial e o valor final, e a grandeza a medir.

Gama ou *campo de medição* — Gama de medição é o intervalo de valores da grandeza a medir que se consegue avaliar com o instrumento de medição, para os quais o erro de leitura se mantém dentro de determinados limites.

Gama de temperatura de funcionamento — Gama de temperatura ambiente para a qual é possível que o instrumento funcione dentro dos limites das respectivas características.

Gama de temperatura compensada — Gama de temperatura ambiente para a qual o instrumento funciona dentro dos limites das respectivas características, sendo desprezável o efeito da variação da temperatura.

Escala completa — Escala completa corresponde à distância do valor mínimo ao valor máximo da gama de medição. Coincide com o limite superior da gama de medição quando esta é definida para um intervalo de valores que se inicia em zero.

Sensibilidade — Sendo um instrumento de medição um sistema que a uma variação de um dado sinal de entrada faz corresponder uma variação da sua saída, a sensibilidade do instrumento é dada pelo quociente entre a variação da resposta (ΔS_{out}) e a variação do sinal de entrada (ΔS_{in}).

$$\text{Sensibilidade} = \frac{\Delta S_{out}}{\Delta S_{in}} \quad (3.1)$$

Conforme se ilustra na Figura 3.1 esta característica é definida em torno de cada ponto de funcionamento, podendo não ser a mesma em todos os pontos. As unidades em que a sensibilidade é expressa depende do instrumento de medição (Campilho, 2000). Por exemplo, num transdutor de temperatura resistivo, a sensibilidade é expressa em $\Omega/^\circ\text{C}$.

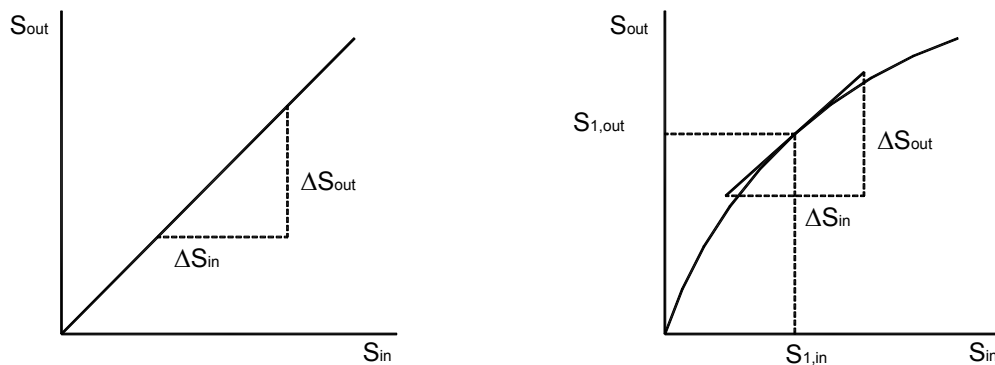


Figura 3.1 — Definição de sensibilidade.

Resolução — Resolução de um instrumento de medição é a menor variação da grandeza de entrada para a qual existe variação da saída. Em certos instrumentos é particularmente nítida a existência de

pequenas variações do sinal de entrada para as quais a saída se mantém inalterada. A resolução é expressa em unidades da grandeza de entrada.

Folga — Designa-se por folga a zona de início da escala, que corresponde a um intervalo mais ou menos lato de valores da grandeza de entrada, para a qual não existe variação perceptível na saída. A folga é expressa em unidades da grandeza de entrada (ver Figura 3.2).

Saturação — Designa-se por saturação do instrumento de medição a zona do fim da escala, a partir da qual a diferentes valores da grandeza de entrada não corresponde variação significativa do valor de saída (ver Figura 3.2).

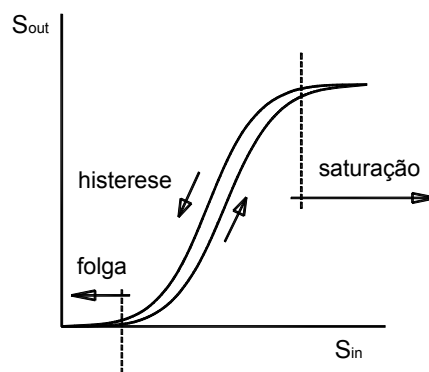


Figura 3.2 — Conceitos de folga, histerese e saturação.

Histerese — A histerese caracteriza-se pela dependência da variável de saída em relação à variação crescente ou decrescente do sinal de entrada (ver Figura 3.2). A histerese pode ser provocada, por exemplo, por atrito mecânico, por efeito térmico ou pela existência de folga. Este valor costuma definir-se em percentagem do valor de fim de escala.

Erro de zero — As escalas dos instrumentos de medição são vulgarmente iniciados por zero. Se para uma entrada nula o instrumento indicar um valor diferente de zero diz-se que existe um erro de zero. Este erro pode ser corrigido por ajuste adequado da escala (ver Figura 3.3).

Deriva — Deriva é um fenómeno que se caracteriza pela alteração das características metrológicas do instrumento de medição ao longo do tempo. Pode afectar, entre outras, a sensibilidade e o ajuste.

Fidelidade — Fidelidade é uma característica que fornece uma indicação sobre os erros sistemáticos do instrumento cometidos no processo de medição. Os instrumentos de medição podem apresentar, em maior ou menor grau, valores com erro sistemático, revelando um erro de fidelidade na medição. Dependendo da qualidade do instrumento, os erros de fidelidade são diferentes, podendo ser agrupados em classes, em geral identificados por um número ou símbolo.

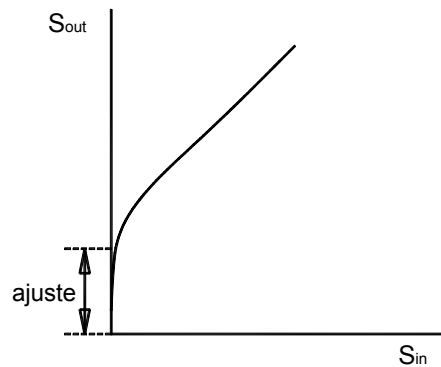
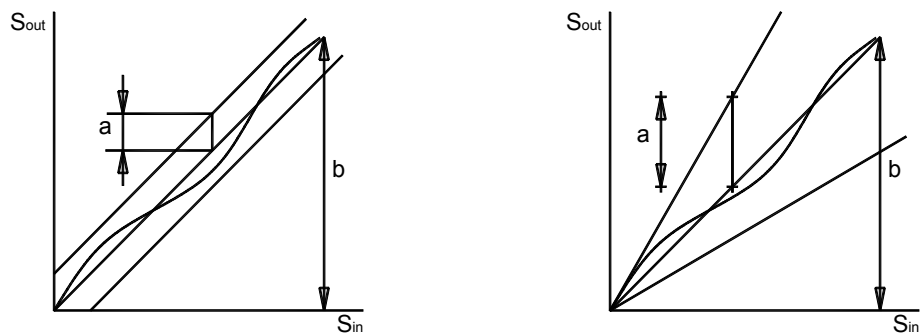


Figura 3.3 — Erro de zero.

Linearidade — A linearidade traduz o intervalo entre dois segmentos de recta no qual se situa a característica do instrumento de medição. Um instrumento de medição que apresente boa linearidade é porque tem uma sensibilidade praticamente constante. Conforme se esquematiza na Figura 3.4 estes segmentos podem ser definidos em relação ao valor de fim de escala ou ao valor medido, surgindo então segmentos paralelos ou segmentos concorrentes, respectivamente.



a) Referida ao fim da escala

b) Referida a um ponto de leitura

Figura 3.4 — Conceito de linearidade.

A linearidade corresponde assim ao desvio máximo da relação linear expressa em percentagem sendo dada pela expressão:

$$Linearidade = \left(1 - \frac{a}{b}\right) \times 100 \text{ [\%]}, \quad (3.2)$$

em que a e b têm o significado expresso na Figura 3.4.

Estabilidade — Estabilidade é a aptidão do instrumento de medição em conservar as suas características metrológicas ao longo tempo. É dada pela variação percentual do sinal de saída, mantendo constantes no tempo o sinal de entrada e as condições de medição.

Tempo de resposta — Designa-se tempo de resposta de um instrumento ao intervalo de tempo que decorre desde a variação de sinal de entrada até ao momento em que o sinal de saída atinja o seu valor final, em regime estável. Este conceito está representado na Figura 3.5.

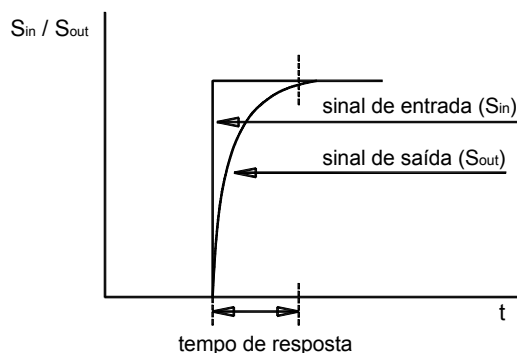


Figura 3.5 — Tempo de resposta de um instrumento de medição.

Exactidão, precisão ou acuidade — A acuidade de um instrumento de medição traduz a diferença entre o valor da medição efectuada e o valor exacto, ou convencionado exacto, da grandeza medida.

Repetibilidade — Em termos qualitativos a repetibilidade é definida como a concordância entre resultados individuais num conjunto de medições, usando o mesmo método, com os mesmos materiais e sob as mesmas condições, nomeadamente, com o mesmo operador, os mesmos meios, no mesmo local e com curtos intervalos de tempo entre eles. É dada pelo valor abaixo do qual o valor absoluto da diferença entre os dois resultados experimentais é esperado ser encontrado. A esta diferença está associada uma probabilidade de ocorrência. Na ausência de outras indicações, essa probabilidade é em geral tomada como 95%.

Reprodutibilidade — Reprodutibilidade define-se de modo idêntico à repetibilidade como a concordância entre resultados individuais obtidos através do mesmo método, com os mesmos materiais mas sob condições diferentes.

Incerteza de uma medição — Trata-se do parâmetro que caracteriza o intervalo de valores obtidos numa série de medições de uma mesma grandeza e no qual se espera que esteja situado o

verdadeiro valor da grandeza medida. Este intervalo de incerteza resulta de erros de medição, alguns dos quais inerentes à repetibilidade e à reprodutibilidade, e é traduzido pelo desvio padrão.

3.4 TRANSDUTORES ELÉCTRICOS

3.4.1 Introdução

Os primeiros instrumentos de medição desenvolvidos para a observação de estruturas de engenharia civil eram puramente mecânicos. Alguns deles ainda hoje são usados, como o alongâmetro de Amsler ou o clinómetro Stoppani. O sucesso da sua carreira até aos nossos dias em muito se fica a dever à sua elevada reprodutibilidade, simplicidade de utilização e ainda devido ao facto de não necessitarem de energia exterior para a sua activação. Contudo, de um modo geral, apresentam baixa sensibilidade, grandes dimensões, baixa resposta em frequência e sérias dificuldades no registo e transmissão automático de dados.

É provavelmente por este último motivo, associado ao desenvolvimento da electrónica, que se desenvolveram os transdutores eléctricos cujo sinal poderá ser facilmente processado, transmitido e armazenado, acedido remotamente através de uma rede de informação, ou simplesmente visualizado num mostrador instalado no local da medição.

Os transdutores eléctricos podem fornecer um sinal de saída que é função contínua da grandeza medida, designados por transdutores analógicos, ou fornecer um sinal de saída de natureza binária, designados neste caso por transdutores digitais.

Os transdutores eléctricos, e de um modo especial os analógicos, são actualmente utilizados em larga escala nos sistemas de monitorização de estruturas, justificando-se por isso um olhar mais atento a algumas particularidades do funcionamento destes últimos, e da sua integração nos sistemas de monitorização de estruturas.

3.4.2 Condicionamento do sinal analógico

Existe uma grande variedade de transdutores desenvolvidos para transformar diferentes grandezas em sinais eléctricos analógicos, produzindo sinais de saída com características muito diversas. O condicionamento de sinal é o conjunto de operações realizadas sobre esses sinais para os transformar numa forma adequada, de acordo com um protocolo de comunicação mais ou menos estabelecido, de modo a serem interpretados por outros elementos ou equipamentos do sistema de medição. Muitas vezes o efeito do condicionamento de sinal é descrito em termos de função de transferência no sentido em que o sinal de saída é função do sinal de entrada (Johnson, 1990).

Podem-se considerar vários tipos genéricos de condicionamento de sinal. O método mais simples do condicionamento de sinal é a alteração do nível do sinal, sendo o caso mais vulgar a ampliação ou atenuação de um nível de tensão.

Contudo outros métodos podem ser adoptados como a linearização do sinal. Em muitos casos o sinal de saída dos transdutores apresenta uma relação não linear com a grandeza que se pretende medir. Mesmos nos instrumentos aproximadamente lineares podem surgir problemas quando são necessárias medidas precisas da grandeza a medir. Nestes casos, uma das funções do condicionamento de sinal analógico é a linearização da resposta do transdutor. A linearização pode ser feita, por exemplo, através de um amplificador cujo ganho seja função do nível de tensão de entrada tal que permita linearizar toda a variação da tensão de saída com a tensão de entrada.

Frequentemente o condicionamento de sinal é utilizado para converter um tipo de variação eléctrica noutra. Como adiante se verá, existe um importante conjunto de transdutores em que a grandeza é medida pela alteração da resistência eléctrica do transdutor. Nestes casos, utiliza-se um circuito que converte esta variação de resistência num sinal de tensão ou de corrente. Esta conversão é geralmente feita com recurso a pontes de medição, nomeadamente quando é muito pequena a variação relativa da resistência, podendo ser também utilizados alternativamente ou em complemento, amplificadores cujo ganho varia com a resistência. Os circuitos em ponte, da qual a ponte de Wheatstone é a mais conhecida, são um exemplo desta forma de condicionamento de sinal. Pela sua relevância nas aplicações na área da monitorização de estruturas, a ponte de Wheatstone será objecto de apresentação detalhada no capítulo dedicado à medição da extensão.

Apresenta-se de seguida outros elementos que podem igualmente integrar o sistema de condicionamento de sinal.

Conversores tensão/corrente e corrente/tensão

Os sinais eléctricos podem ser transmitidos em corrente ou em tensão sendo os primeiros preferidos por serem independentes das variações de carga. Frequentemente os níveis de corrente utilizados variam entre 4mA e 20mA. Isto conduz à necessidade de converter níveis de tensão nos valores apropriados de níveis de corrente no transmissor, bem como converter de novo a corrente em tensão no receptor. São por isso com frequência necessários conversores tensão/corrente e corrente/tensão.

Conversores analógico/digitais

A utilização de equipamento electrónico no processamento e armazenamento das grandezas medidas requer a conversão de dados analógicos num formato digital, com recurso a circuitos integrados chamados conversores analógico/digitais (ADCs, sigla de *analogue digital converters*). Além disso, é normalmente necessária a conversão do sinal analógico que sai do instrumento de medição para o adaptar aos requisitos de entrada do ADC. Por exemplo, um transdutor pode

apresentar um sinal de saída que varia entre 30mV e 80mV, enquanto o ADC ao qual este está ligado, pode necessitar de uma tensão que varia entre 0V e 5V. Nestes casos são desenvolvidos circuitos conversores de sinal para fazer o interface da saída do transdutor à entrada exigida pelo ADC.

Filtros

A filtragem é uma outra forma de condicionamento de sinal. São circuitos que eliminam sinais que são detectados pelos transdutores, que não resultam de uma variação da grandeza que se pretende medir mas sim da agressividade do meio onde o transdutor está instalado. Por exemplo, sinais com frequências normalizadas de 60Hz e 400Hz são típicas de ambientes industriais. É por isso vantajoso o desenvolvimento de filtros que podem ser do tipo passa/alto, passa/baixo ou passa/banda.

3.5 SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

A aplicação dos sensores de fibra óptica à monitorização das estruturas de engenharia civil tem experimentado nos últimos anos um grande desenvolvimento. A imunidade aos campo electromagnéticos, a reduzida perda de sinal para grandes distâncias e as reduzidas dimensões são apenas algumas das suas principais vantagens.

A validação desta nova família de sensores tem sido feita por comparação com os sensores convencionais dos quais há já uma grande experiência, procurando adquirir-se confiança e experiência na sua utilização.

A importância deste tema aliado ao facto de os sensores de fibra óptica apresentarem características substancialmente diferentes dos demais, justifica que sejam tratados num capítulo específico — Capítulo 9.

CAPÍTULO 4

MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO

4.1 INTRODUÇÃO

A medição do deslocamento de pontos seleccionados da estrutura constitui uma informação elementar para a observação do seu comportamento. Um exemplo corrente de aplicação é a medição da flecha de pontos conhecidos do tabuleiro de uma ponte, durante um ensaio de carga estática. Esta medição pode ser obtida através da variação do deslocamento desses pontos, antes e depois do carregamento. Para esta medição é necessário que seja definido um ponto fixo, que pode ser exterior ou interior à estrutura. Neste último caso, os deslocamentos são medidos em relação a pontos de referência localizados, por exemplo, no topo dos pilares.

Conforme foi já genericamente referido, na medição pode ser usado o método directo e o método indirecto. Ao aplicar estes conceitos à medição do deslocamento, pode dizer-se que no primeiro o valor do deslocamento é obtido directamente por leitura do instrumento de medida, como por exemplo, uma régua graduada. Na aplicação do método indirecto o valor do deslocamento é obtido como resultado da medição de uma ou mais grandezas com ele relacionadas, como por exemplo, quando se utiliza um transdutor eléctrico de deslocamento. Na medição podem ainda distinguir-se métodos de medição absolutos e métodos de medição diferenciais. No método de medição absoluto o valor do deslocamento é obtido pela indicação do instrumento utilizado. No método de medição diferencial, determina-se a variação entre o deslocamento a medir, e um comprimento considerado padrão.

Neste contexto apresentam-se alguns dos instrumentos mais utilizados na medição dos deslocamentos, na área das estruturas de engenharia civil. De entre estes, os instrumentos eléctricos, como os LVDT, são os que têm maior aplicação na monitorização das estruturas.

4.2 BLOCOS PADRÃO

Os blocos padrão, são os instrumentos de medição de comprimento com precisão mais elevada, dos utilizados em Metrologia Dimensional (Couto, 1989). São paralelepípedos de aço ou de carboneto de tungsténio, de elevada estabilidade dimensional, faces de definição planas e paralelas entre si, cujas dimensões são conhecidas com precisão muito elevada. As faces são de tal modo planas, que é possível efectuar um contacto perfeito entre blocos, verificando-se aderência espontânea devido à atracção molecular entre as superfícies. Recomenda-se, inclusive, não deixar as faces em contacto durante muito tempo, sob pena de não ser possível voltar a separá-los, sem causar danos às superfícies respectivas. É possível, através da combinação de diversos blocos, obter praticamente qualquer medida. Os blocos padrão são usados no método de medição diferencial. A Figura 4.1 apresenta um conjunto em estojo de blocos padrão da PTB — Physikalisch- Technische Bundesanstalt.



Figura 4.1 — Blocos Padrão.

4.3 INSTRUMENTOS BASEADOS NUM FUSO MICROMÉTRICO

Os instrumentos baseados num fuso micrométrico são vulgarmente conhecidos por micrómetros. O seu princípio de funcionamento baseia-se na rotação de um fuso de precisão com um passo conhecido, sendo a leitura efectuada contando o número de voltas e a posição angular deste. São

instrumentos de precisão e podem apresentar-se com diversas formas para controlar diferentes parâmetros.

4.4 INSTRUMENTOS BASEADOS NUMA RÉGUA DE TRAÇOS

São exemplo dos instrumentos baseados numa régua de traços, os paquímetros e os medidores de altura. A leitura é feita sobre uma régua de traços, geralmente gravada em milímetros. Os paquímetros e os medidores de alturas têm um nónio, que é um auxiliar de leitura.

4.5 COMPARADORES MECÂNICOS

Os comparadores mecânicos são instrumentos que permitem medir deslocamentos, podendo ser classificados, quanto ao princípio de funcionamento, em comparadores de engrenagem, comparadores de elástico torcido e comparadores de alavancas e engrenagens (Couto, 1989). Os mais comuns são os comparadores de engrenagem, e baseiam-se na rotação de um pinhão sobre uma cremalheira, podendo existir desmultiplicação para indicação num quadrante. A Figura 4.2 apresenta um exemplo de um destes transdutores, da ELE International Ltd., com um campo de medida de 20mm, permitindo medir até à centésima de milímetro.



Figura 4.2 — Comparador mecânico de deslocamento.

4.6 INSTRUMENTOS CAPACITIVOS

Os instrumentos capacitivos baseiam-se na variação da capacidade de um condensador por variação da distância entre placas. Nos instrumentos de medida este fenómeno é utilizado de modo a que a uma variação da distância corresponda uma indicação numérica da distância percorrida. São exemplo destes instrumentos de medida o paquímetro digital e o comparador digital. A Figura 4.3 ilustra um exemplo de um comparador digital, modelo Digimatic Indicator, fabricado pela Mitutoyo. Permite medir deslocamentos até 12mm, com precisão da milésima de milímetro, para uma temperatura ambiente entre 0°C e 40°C. Trata-se de um equipamento, que munido de uma pilha de 1,5V, tem uma utilização autónoma e expedita. Este modelo pode ainda ser ligado a um registorador que imprime em papel as leituras que vão sendo realizadas.



Figura 4.3 — Comparador digital de deslocamento.

Também da Mitutoyo, apresenta-se na Figura 4.4 um paquímetro digital, que permite medir dimensões interiores de aberturas ou orifícios (parte superior esquerda na figura), e dimensões exteriores ou espessuras (parte inferior esquerda na figura). Além disso tem um cursor (extremidade direita na figura) que mede profundidades. A precisão da medição é da centésima de milímetro.



Figura 4.4 — Paquímetro digital.

4.7 TRANSDUTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

O LVDT (Linear Variable Differential Transformer), pertence à classe de transdutores indutivos de deslocamento, em que um núcleo móvel é usado para variar o acoplamento de campo magnético entre três enrolamentos. A sua estrutura básica é constituída por um núcleo de material permeável e três enrolamentos, como se mostra na Figura 4.5. O núcleo interior, ao ser excitado com um enrolamento primário percorrido por corrente alternada, gera um campo magnético. Os dois enrolamentos secundários têm tensões induzidas devido ao acoplamento de fluxo com o primário. Quando o núcleo está centrado, a tensão induzida em cada secundário é a mesma. Mas quando o núcleo é deslocado, a variação no acoplamento de fluxo faz aumentar a tensão num secundário e diminuir a do outro. Os dois secundários estão geralmente ligados em série e oposição, de modo que as tensões produzidas em cada um estão desfasadas. Neste caso, como se mostra na Figura 4.6, a amplitude da tensão de saída é zero quando o núcleo está centrado, e aumenta à medida que o núcleo é deslocado num sentido ou noutro.

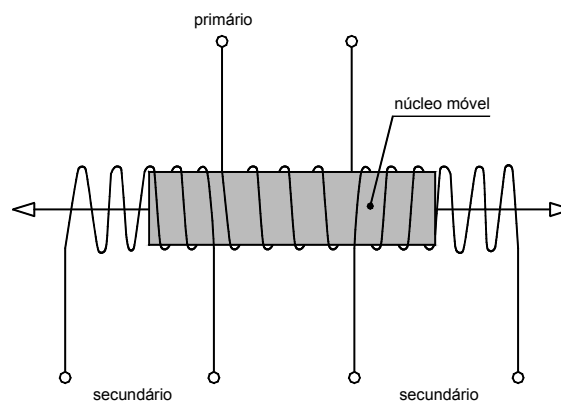


Figura 4.5 — Estrutura básica de um LVDT.

Verifica-se que a amplitude da tensão é linear com o deslocamento do núcleo num certo percurso. Além disso, há a variação da fase conforme o núcleo se desloca num ou noutro sentido, de modo que as mediadas de fase dão o sentido do movimento do núcleo.

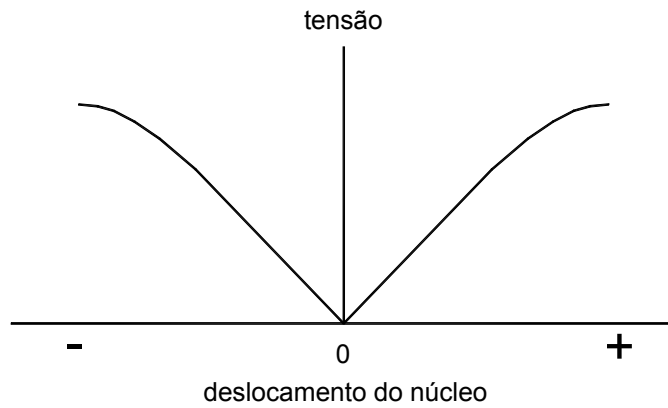


Figura 4.6 — Amplitude da tensão de saída de um LVDT.

Estes transdutores apresentam uma elevada repetibilidade, boa estabilidade a longo prazo, prolongada vida mecânica e uma boa resposta tanto em medidas estáticas como em dinâmicas (Bastos, 1999). Embora de custo superior aos comparadores mecânicos, são preferencialmente utilizados em medições estáticas e dinâmicas do deslocamento, pela possibilidade de registo através de ligação a um sistema automático de aquisição.

A Figura 4.7 apresenta dois exemplos destes transdutores de deslocamento, fabricados pela RDP Electronics Ltd., sendo o primeiro deles de aplicação geral, e o segundo, devido ao encapsulamento de protecção ambiental, está especialmente dedicado às aplicações no exterior de elementos estruturais. Estão disponíveis no mercado diversos modelos com campos de aplicação específicos. Adiante será descrita a aplicação destes sensores na monitorização do comportamento de uma estrutura enterrada.



a) Para aplicação geral



b) Para aplicação no exterior

Figura 4.7 — Transdutores indutivos de deslocamento, LVDT.

CAPÍTULO 5

MEDIÇÃO DA EXTENSÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes objectivos da monitorização de estruturas de engenharia civil é a obtenção da distribuição de tensões em cada uma das secções instrumentadas. A partir da definição do estado de tensão nestas secções, e com base em modelos numéricos devidamente calibrados, será então possível estimar a distribuição de esforços na estrutura e a distribuição de tensões noutras secções.

Na observação do comportamento de estruturas o estado de tensão é obtido a partir do estado de deformação, medido em pontos seleccionados das secções instrumentadas. A escolha dos instrumentos de medida, do equipamento de aquisição, das secções da estrutura a instrumentar e a localização dos sensores em cada secção são opções de grande importância e que têm de ser estabelecidas numa primeira fase dos trabalhos, aquando da definição do sistema de monitorização. Como adiante se verá, a obtenção do estado de tensão, a partir das extensões medidas, constitui um dos maiores desafios da observação de estruturas.

Os instrumentos de medida destinados à medição pontual das extensões são designados extensómetros, sendo alguns para aplicação à superfície e outros para embeber. Os primeiros estão especialmente indicados para a medição de extensões em estruturas de madeira, alvenaria, aço, ou ainda de estruturas de betão existentes. Os extensómetros de embeber são os mais indicados na medição das extensões em secções de estruturas de betão, necessitando ser instalados aquando da sua betonagem.

O conceito de ponto na medição da extensão é fictício, tratando-se na realidade de um segmento, de comprimento conhecido, ao longo do qual vão ser medianizadas as extensões. O comprimento deste

segmento deve ser definido de acordo com as características do material estrutural, nomeadamente tendo em atenção a sua heterogeneidade. Nos materiais mais homogéneos, como o aço, podem em geral ser adoptados extensómetros de menor dimensão. Nos materiais mais heterogéneos, como o betão, a dimensão dos extensómetros está condicionada pela dimensão dos inertes utilizados.

Dado que a extensão corresponde a uma variação relativa de comprimento, as extensões podem também ser obtidas a partir de transdutores de deslocamento. Para isso são instalados transdutores de deslocamento, que medem a variação de afastamento entre pontos extremos de um segmento, definido junto à face exterior do elemento estrutural. Tal como na definição do comprimento dos extensómetros, o comprimento do segmento de referência é definido em função das características do material que está a ser observado: (1) para materiais muito homogéneos este comprimento pode ser mais pequeno; (2) para materiais muito heterogéneos, é de todo conveniente a adopção de segmentos mais compridos, evitando-se deste modo, a medição de singularidades pouco representativas do estado de deformação da vizinhança do ponto em observação. Este método de obtenção das extensões está especialmente indicado para aplicações laboratoriais, atendendo a que, ao contrário da generalidade dos extensómetros, é possível a sua reutilização.

O problema mais complexo da monitorização estrutural coloca-se precisamente na interpretação dos valores lidos das extensões e na obtenção das tensões a partir das extensões:

- 1) Por um lado, existe um conjunto de factores que afectam as características de medição dos instrumentos de medida, de que se salienta a variação de temperatura. Daí que os valores medidos podem não ser os realmente verificados na estrutura.
- 2) Por outro lado, nem todas as deformações induzem tensões na estrutura. Por exemplo, a deformação livre da estrutura, devido à variação de temperatura, ou ainda, no caso das estruturas de betão, o fenómeno da retracção ou da fluência, ou ainda a relaxação do aço.
- 3) Finalmente, na observação das estruturas de betão durante a construção, acresce a dificuldade decorrente de as propriedades dos materiais variarem significativamente, dificultando a definição das respectivas leis constitutivas, e de as acções aplicadas à estrutura variarem também significativamente no mesmo período.

Neste capítulo são abordados os aspectos exclusivamente relacionados com a medição das extensões, nomeadamente no que diz respeito à descrição dos instrumentos de medida e ao princípio de funcionamento com uma breve referência aos respectivos sistemas de condicionamento de sinal. São ainda apresentadas as causas de erro na medição e referidos os processos disponíveis para os eliminar, ou pelo menos, para minorar os respectivos efeitos.

5.2 OBTENÇÃO DA EXTENSÃO A PARTIR DO DESLOCAMENTO

A variação da extensão de um dado elemento estrutural, num determinado período de observação, pode ser obtida a partir da medição do deslocamento observado entre dois pontos extremos de um segmento, de comprimento conhecido. Este segmento designa-se por base de medida, ou comprimento de referência. Para a medição do deslocamento pode ser usado por exemplo, o comparador ou o LVDT. A extensão ε será então obtida a partir da expressão:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0}, \quad (5.1)$$

onde:

Δl_0 — representa a variação de comprimento da base de medida;

l_0 — designa o comprimento da base de medida.

Este procedimento permitirá obter o valor da extensão verificada à superfície do elemento. Está por isso indicado no caso da observação de estruturas de betão existentes (nas quais não puderam ser previamente instalados sensores de embeber) ou de outros materiais estruturais, como o aço ou a alvenaria, em que o embeber de sensores não é praticável.

O comprimento da base de medida deve ser criteriosamente seleccionado em função do material que está a ser observado. No caso do betão, dada a sua heterogeneidade, este deve ser pelo menos três a quatro vezes a maior dimensão do inerte. Deste modo procura-se garantir que o resultado da medição seja representativo de uma zona alargada do elemento, e que não dependa de ocorrências muito pontuais, possíveis de surgir no interior da massa do betão.

5.3 EXTENSÓMETRO DE CORDA VIBRANTE

5.3.1 Princípio de funcionamento

O extensómetro de corda vibrante baseia-se no facto de existir uma relação entre a frequência de vibração de uma corda e a tensão a que essa corda está sujeita.

No interior de uma cápsula (ver Figura 5.1) é instalada uma corda de aço, da ordem dos 0,3mm de diâmetro, fixada pelas suas extremidades, sujeita a elevada tensão de tracção. À variação de extensão do sensor imposta pela estrutura à qual está aplicado, corresponde a uma variação de tensão na corda e por consequência uma variação de frequência natural de vibração. Uma corrente ao percorrer uma bobine instalada na vizinhança da corda, cria um campo electromagnético que

excita a corda a qual passa a oscilar à frequência de ressonância, determinada pela tensão a que está sujeita. A oscilação da corda no interior desse campo magnético induz uma corrente alternada na bobina que é detectada pelo sistema de aquisição. O dispositivo que excita a corda passa então a actuar como um dispositivo de aquisição de sinal.

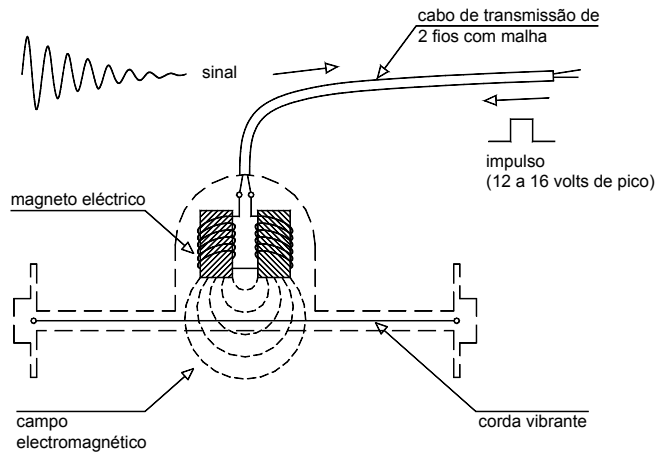


Figura 5.1 — Esquema de funcionamento de um extensómetro de corda vibrante.

A frequência de vibração f da corda nestas condições é dada pela expressão:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{m}}, \quad (5.2)$$

onde:

l — é o comprimento da corda;

σ — é o valor da tensão a que a corda está sujeita;

m — é a massa da corda.

Como,

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (5.3)$$

em que E é o módulo de elasticidade da corda.

Admitindo l , m e E constantes, e substituindo (5.3) em (5.2), virá:

$$f = k_1 \sqrt{\varepsilon}, \quad (5.4)$$

com,

$$k_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{m}}. \quad (5.5)$$

Ou ainda,

$$\varepsilon = k_2 f^2, \quad (5.6)$$

com,

$$k_2 = \frac{4l^2 m}{E}. \quad (5.7)$$

Em termos de variação de deformação, se for f_i a frequência de vibração de referência (frequência inicial, antes da deformação) e f_f o correspondente valor após a deformação (frequência final), poderá escrever-se:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_f - \varepsilon_i = k_2(f_f^2 - f_i^2), \quad (5.8)$$

A relação entre a variação da extensão e a correspondente variação de frequência da corda segue portanto uma lei quadrática.

O comprimento de referência do sensor corresponde à distância entre pontos de fixação do extensómetro ao elemento estrutural, coincidindo aproximadamente com distância entre pontos de fixação da corda e pode ir, correntemente, de 140mm até 250mm. Com estes sensores é possível detectar extensões da ordem $10 \times 10^{-5} \text{m/m}$ e um campo de medida da ordem de $3\,000 \times 10^{-6} \text{m/m}$. Segundo os fabricantes a perda de sinal ao longo dos cabos que ligam o sensor ao sistema de aquisição é muito reduzida, podendo-se adoptar comprimentos de cabo até 2 000m. Uma das grandes vantagens destes extensómetros resulta da experiência adquirida ao longo de décadas de utilização (Marecos, 1979). Existem em Portugal sensores deste tipo, instalados há mais de trinta anos, ainda em funcionamento.

Os extensómetros de corda vibrante apresentam alguma sensibilidade aos efeitos da temperatura que decorre essencialmente do facto de os coeficientes de dilatação térmica da corda de aço que constitui o sensor (α_w) e do betão (α_c) não serem exactamente os mesmos. O coeficiente de dilatação térmica linear pode ser de $13 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ para o aço e de $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ para o betão, havendo portanto um diferencial que pode atingir os $3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Ou seja, conforme se apresenta na Figura 5.2, para uma variação idêntica de temperatura ΔT na corda de aço do extensómetro e no betão, da diferença entre os coeficientes de dilatação térmica resulta uma variação da extensão da corda $\Delta\varepsilon_w$ dada por:

$$\Delta \varepsilon_w = (\alpha_w - \alpha_c) \Delta t, \quad (5.9)$$

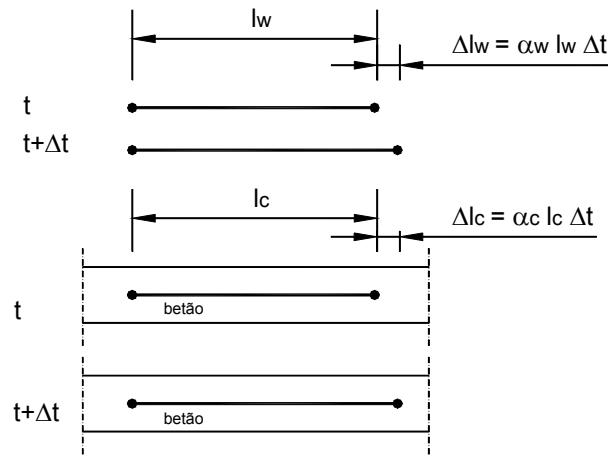


Figura 5.2 — Efeito da variação de temperatura num extensómetro de corda vibrante.

Os fabricantes referem que para variações de temperatura até 10°C, a temperatura pode afectar até 0,02% da gama de medida do sensor, o que é considerado pouco. Para variações superiores de temperatura recomenda-se a medição desta na zona onde o sensor é instalado, definindo cada fabricante o respectivo coeficiente de compensação.

Em rigor, o valor do coeficiente de dilatação térmica não é constante para qualquer composição de betão, nem para qualquer tipo de aço, podendo mesmo variar com a série a que o extensómetro pertence. Daí que um procedimento recomendável será o de instalar pelo menos um sensor da mesma série num prisma do mesmo material estrutural, e proceder a testes laboratoriais, com vista a analisar o efeito da variação da temperatura na medição. Quando o material é o betão estes ensaios não são fáceis de conduzir, e os resultados podem ser de interpretação complexa, pois a uma variação da temperatura corresponde uma variação de humidade, cada um destes efeitos induzindo parcelas de deformação que são adicionáveis mas têm sinais opostos. A colocação destes prismas em câmaras de cura, em que se faz variar a temperatura mas se mantém constante a humidade pode igualmente não ser a solução, atendendo a que não são estas as condições que se verificam em obra.

Conforme foi exposto anteriormente, a sensibilidade dos instrumentos de medição à temperatura é uma realidade comum à maior parte deles, não sendo uma particularidade dos sensores de corda vibrante. O LNEC, com larga experiência na utilização destes sensores, tem optado pela medição da temperatura em obra, e em simultâneo, pela condução de ensaios em laboratório.

5.3.2 Extensómetros de embeber no betão

Existe um importante conjunto de sensores construídos com base no princípio da corda vibrante, nomeadamente, células de pressão, células de carga, transdutores de deslocamento, sensores de temperatura, entre outros. No domínio dos extensómetros distinguem-se fundamentalmente os de embeber no betão e os de aplicar à superfície.

A Figura 5.3 apresenta um exemplo de um extensómetro de corda vibrante para embeber no betão, fabricado pela empresa inglesa Gage Technique, Lda.. Trata-se do modelo TES/5.5 com encapsulamento em aço inox, constituído por um tubo de 6mm de diâmetro exterior, nas extremidades do qual estão fixados dois discos, também em aço inox, com 40mm de diâmetro e 1mm de espessura. A distância entre discos, que corresponde ao comprimento de referência do extensómetro, é de 140mm.

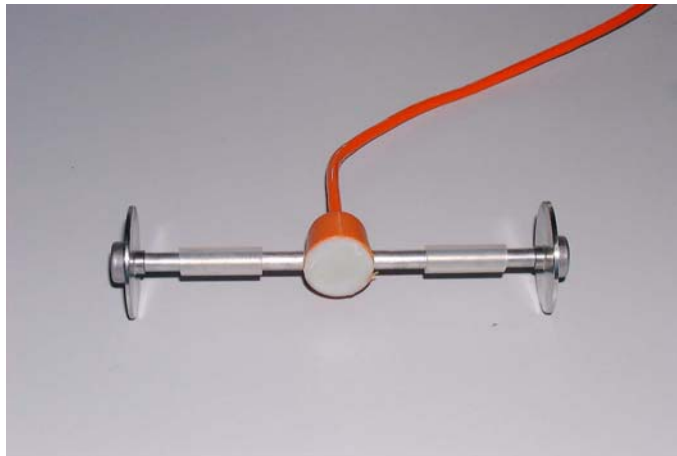


Figura 5.3 — Exemplo de um extensómetro de corda vibrante.

O LNEC tem uma vasta experiência de utilização deste tipo de extensómetros, tendo desenvolvido técnicas muito próprias de aplicação que lhe permitem obter elevadas taxas de sucesso de instalação. Nomeadamente no que diz respeito ao sistema de fixação e de protecção mecânica durante a fase de betonagem. A Figura 5.4 apresenta um exemplo de um extensómetro aplicado em obra pelo LNEC.

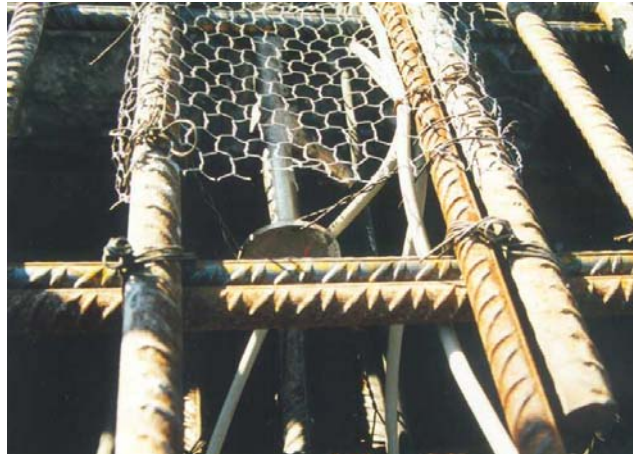


Figura 5.4 — Aplicação em obra de um extensômetro de corda vibrante.

5.3.3 Extensômetros de aplicar à superfície

No que diz respeito aos extensômetros de corda vibrante de aplicar à superfície, o princípio de funcionamento é o mesmo, estando neste caso vocacionados para a instrumentação de estruturas de betão existentes ou de estruturas de aço ou de alvenaria. A Figura 5.5 apresenta um exemplo de um sensor deste tipo, fabricado pela empresa italiana SISGEO, S. r. l..

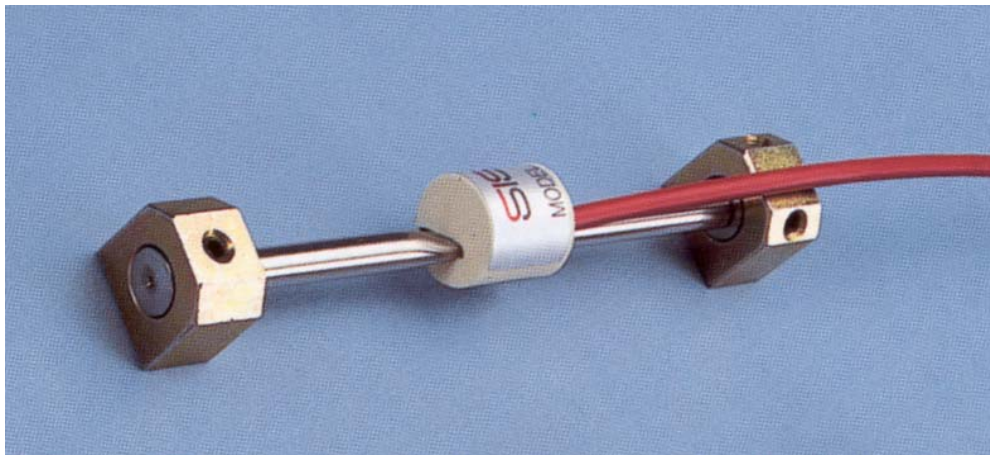


Figura 5.5 — Extensômetro de corda vibrante para aplicação à superfície.

Uma outra aplicação interessante na área das estruturas de engenharia civil é a de um sensor de aplicação à superfície, especialmente desenvolvido para a medição da abertura de fendas no betão ou na alvenaria, ou para a medição da abertura de juntas na transição de dois materiais distintos (por

exemplo aço/betão) ou de juntas de dilatação. A Figura 5.6 apresenta uma aplicação da corda vibrante neste tipo de sensor. Dependendo das suas dimensões, permite medir aberturas até 100mm.

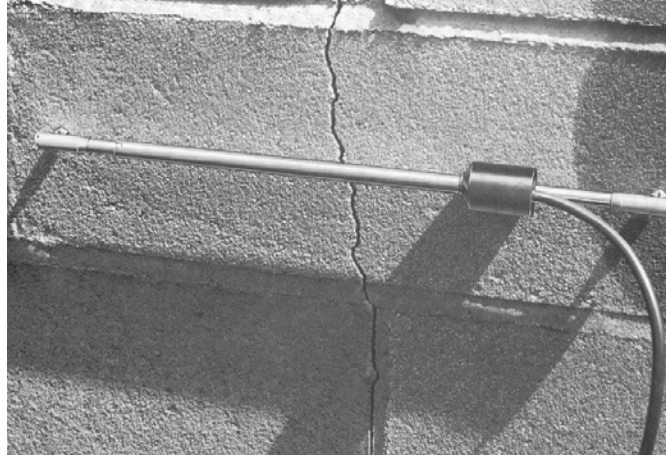


Figura 5.6 — Extensómetro de corda vibrante para medição de abertura de fendas.

5.4 EXTENSÓMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉCTRICA

5.4.1 Princípio de funcionamento

Os extensómetros são baseados na variação da resistência de um condutor ou de um semiconductor, quando sujeito a uma deformação mecânica. Para um dado condutor com comprimento l , secção transversal A e resistividade ρ , a resistência eléctrica R é dada pela expressão:

$$R = \rho \frac{l}{A}. \quad (5.10)$$

Quando se aplica ao condutor uma deformação longitudinal, cada uma destas três quantidades que afectam a resistência varia, e por consequência ocorre uma variação da resistência dada por:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}. \quad (5.11)$$

A alteração de comprimento que resulta da aplicação de uma força F ao condutor, em regime elástico, é dada pela lei de Hooke,

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{dl}{l}. \quad (5.12)$$

A extensão ε é adimensional, mas usualmente é expressa em *microdeformação*, representando-se por:

$$1\mu\varepsilon = 1 \times 10^{-6} \text{ m / m .} \quad (5.13)$$

sendo esta a ordem de grandeza frequentemente observada nos exemplos de aplicação prática.

Em resultado da aplicação de uma tensão longitudinal a um fio condutor ocorre não só uma variação longitudinal do comprimento mas também da secção transversal. Num condutor de secção circular a expressão que relaciona estas duas variações é dada por:

$$\nu = - \frac{dD/D}{dl/l}, \quad (5.14)$$

sendo:

ν — o coeficiente de Poisson;

D — o diâmetro da secção transversal.

l — o comprimento do fio condutor.

Atendendo a que a área da secção transversal de um fio de diâmetro D é dada pela expressão:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (5.15)$$

a variação da secção virá:

$$\frac{dA}{A} = \frac{2dD}{D} = - \frac{2\nu dl}{l}. \quad (5.16)$$

Atendendo a que o volume é dado pela expressão:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} l. \quad (5.17)$$

A correspondente variação será dada pela expressão:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{2dD}{D} = \frac{dl}{l} (1 - 2\nu), \quad (5.18)$$

A alteração da resistividade como resultado da tensão mecânica é designada por efeito piezoresistivo. Nos metais as variações percentuais da resistividade e do volume são proporcionais:

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V}, \quad (5.19)$$

em que C é a constante de Bridgman, que varia entre 1,13 e 1,15 para as ligas correntes de que são feitos os extensómetros, e 4,4 para a platina.

Para materiais isotrópicos em regime elástico, substituindo na expressão (5.11) as expressões (5.16) e (5.19), e atendendo à expressão (5.18), virá:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} [1 + 2\nu + C \times (1 - 2\nu)] = G \frac{dl}{l}. \quad (5.20)$$

Ou, mais simplesmente:

$$\frac{dR}{R} = G \frac{dl}{l}, \quad (5.21)$$

onde G é designado por factor de ganho do extensómetro, definido como:

$$G = 1 + 2\nu + C(1 - 2\nu). \quad (5.22)$$

Para os valores correntes dos diversos parâmetros envolvidos, G toma valores próximos de 2, excepto quando se trata da platina, para a qual G é aproximadamente 6.

A expressão (5.21) pode ainda tomar o seguinte aspecto:

$$x = G\varepsilon, \quad (5.23)$$

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

Ou ainda:

$$\varepsilon = \frac{x}{G}. \quad (5.24)$$

Para pequenas variações da resistência de fios metálicos pode então escrever-se:

$$R = R_0(1 + x), \tag{5.25}$$

em que:

R_0 — é o valor de referência da resistência, ou seja, a resistência a uma dada temperatura de referência, quando não está aplicada qualquer tensão.

Se a resistência eléctrica estiver solidarizada com um dado material, sujeito a uma acção ou a um conjunto de acções, é possível determinar a extensão que o material sofre, a partir da medição da variação da resistência. Uma resistência projectada para medir extensões, constitui um extensómetro de resistência.

A Figura 5.7 a), representa o esquema geral de um extensómetro de colar. Considera-se que todas as extensões ocorrem num mesmo plano, isto é, não existem deformações em nenhuma direcção perpendicular aos fios condutores do extensómetro. Para se obter uma significativa resistência eléctrica do extensómetro este é constituído por um conjunto longitudinal de segmentos, ligados entre si por pequenos segmentos transversais com uma maior secção transversal, formando uma malha. Deste modo, a sensibilidade transversal será, em geral, de apenas 1% a 2% da sensibilidade longitudinal. A malha condutora é impressa por um processo de fotografação sobre uma película metálica de reduzida espessura, depositada sobre uma base de espessura também muito reduzida. A espessura do conjunto pode atingir os 0,025mm.

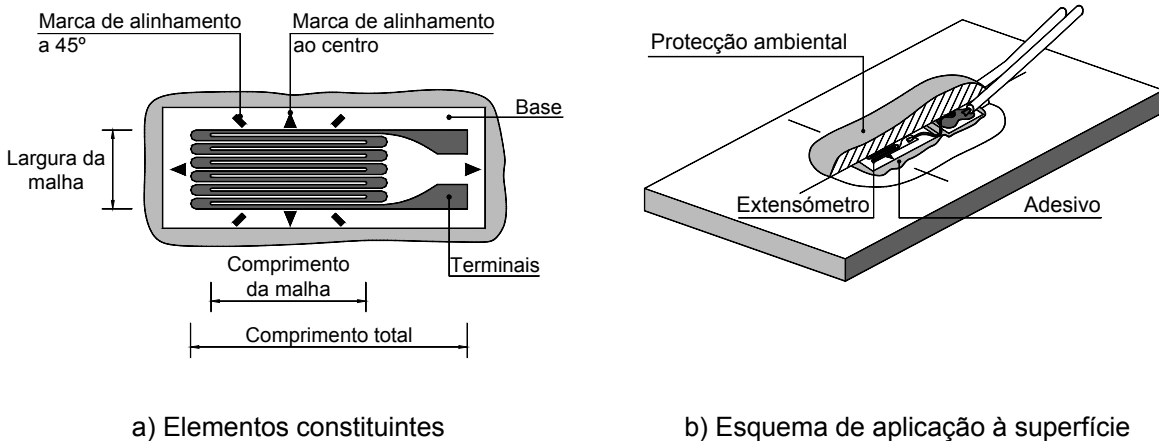


Figura 5.7 — Extensómetro de resistência.

O processo de medição das deformações a partir de extensómetros de resistência tem-se revelado muito útil. Há, contudo, um conjunto de limitações e de procedimentos que deve ser tido em atenção para assegurar a qualidade dos resultados obtidos, destacando-se:

- a) Em primeiro lugar a extensão mecânica aplicada ao condutor constituinte do extensómetro não deve exceder o seu limite de elasticidade. Este valor não deve exceder 4% do comprimento do extensómetro e varia, aproximadamente, entre $3\,000\mu\epsilon$ para extensómetros de semicondutores, e $4\,000\mu\epsilon$ para extensómetros metálicos.
- b) Em segundo lugar a medição só será correcta se toda a extensão for integralmente transmitida ao sensor. Contribui decisivamente para este factor a colagem cuidadosa do extensómetro, com um adesivo elástico e estável com o tempo e com a temperatura. Simultaneamente, o extensómetro deve estar electricamente isolado do material ao qual está aplicado, e protegido das condições ambientais (ver Figura 5.7 b)).

5.4.2 Medição da resistência

Os métodos para a medição da resistência podem ser classificados em métodos de medição do desvio e métodos de determinação de zero.

Nos métodos de medição do desvio a resistência é alimentada, por hipótese, por uma tensão de valor conhecido. A medição da queda de tensão associada permite calcular o valor da resistência. Alternativamente, a resistência pode ser alimentada por uma corrente de intensidade conhecida, sendo medida, neste caso, a correspondente queda de intensidade. Pode ainda ser feita a medição simultânea da tensão e da intensidade. É neste método que se baseiam os multímetros, analógicos ou digitais.

Os métodos de determinação de zero são os mais comuns e baseiam-se nas pontes de medida. Comparativamente com os anteriores, estes são mais precisos, mais fiáveis, mais fáceis de implementar e de custos mais acessíveis. A ponte de Wheatstone, constitui sem dúvida, o processo mais comum de medição de um extensómetro, estando implementada na generalidade dos equipamentos de aquisição de sinal.

5.4.3 Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone é o circuito mais simples e mais vulgar nas aplicações de condicionamento de sinal de extensómetros de resistência eléctrica. Este circuito está representado na Figura 5.8 na sua versão mais elementar. É constituído por quatro braços, aos quais estão associadas, em série e em paralelo, quatro resistências, R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , alimentadas por uma fonte com uma tensão V , e um detector de zero D_0 . Este detector de zero, instalado num braço central da ponte, é usado para comparar os potenciais entre os pontos A e B do circuito.

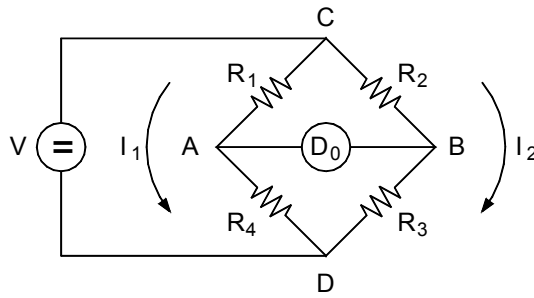


Figura 5.8 — Circuito da ponte de Wheatstone.

Admitindo infinita a impedância do detector, isto é, que o circuito está aberto, a diferença de potencial V_0 entre os pontos A e B é dada pela expressão:

$$V_0 = V_A - V_B, \quad (5.26)$$

em que:

V_A — é o potencial do ponto A em relação ao ponto C,

V_B — é o potencial do ponto B em relação ao ponto C.

Atendendo à associação em série das resistências R_1 e R_4 , posicionadas nos dois braços CA e AD, pode escrever-se:

$$I_1 = \frac{V}{R_1 + R_4}, \quad (5.27)$$

em que I_1 é a intensidade de corrente que passa através dos braços CAD da ponte. Por outro lado,

$$V_A = I_1 R_1. \quad (5.28)$$

Substituindo (5.27) em (5.28) virá:

$$V_A = \frac{V}{R_1 + R_4} R_1 = \frac{V R_1}{R_1 + R_4}. \quad (5.29)$$

De igual modo, em relação às resistências R_2 e R_3 , posicionadas nos braços CB e BD, respectivamente, pode escrever-se:

$$I_2 = \frac{V}{R_2 + R_3}, \quad (5.30)$$

em que I_2 é a corrente que passa através dos braços CB e BD da ponte. Por outro lado,

$$V_B = I_2 R_2. \quad (5.31)$$

Substituindo (5.30) em (5.31), pode escrever-se:

$$V_B = \frac{V}{R_2 + R_3} R_2 = \frac{V R_2}{R_2 + R_3}. \quad (5.32)$$

Substituindo (5.29) e (5.32) em (5.26), virá:

$$V_0 = V_A - V_B = \frac{V R_1}{R_1 + R_4} - \frac{V R_2}{R_2 + R_3}, \quad (5.33)$$

ou ainda,

$$V_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} \times V. \quad (5.34)$$

Esta relação mostra que a diferença de potencial é função da tensão com que é alimentada a ponte, e dos valores das resistências. A diferença do numerador indica que existe uma relação entre os valores das resistências que anula a diferença entre a tensão na entrada e na saída do detector. Essa relação é a conhecida condição de equilíbrio da ponte de Wheatstone, dada pela expressão:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad (5.35)$$

Uma vez equilibrada a ponte, é possível determinar o valor de uma das resistências, conhecido o valor das restantes. Por exemplo, o valor de R_3 , pode ser obtido a partir das resistências R_1 , R_2 e R_4 , por hipótese de valor conhecido, através da expressão:

$$R_3 = R_4 \frac{R_2}{R_1}. \quad (5.36)$$

Além disso, esta expressão demonstra dois importantes aspectos: Por um lado, que variações em R_3 são directamente proporcionais às correspondentes variações que têm de ser introduzidas em R_4 para que a ponte continue em equilíbrio. Por outro lado, que esta medição é independente do tipo de alimentação, em tensão ou em corrente, e das suas possíveis flutuações. Além disso, a alimentação e o detector podem trocar de posição nos pontos da ponte, que o resultado da medição não é afectado.

Conforme foi já referido, a ponte de Wheatstone está na base da maior parte dos sistemas de medição dos extensómetros de resistência. Na Figura 5.9 a) a resistência R_3 é substituída por um

extensómetro de valor nominal R_0 . Ao variar a resistência do extensómetro de uma quantidade x , essa variação pode ser determinada, usando a ponte de Wheatstone descrita. Bastará para isso, variar R_4 , até que o equilíbrio da ponte seja restabelecido (corrente nula no detector). Admitindo que se mantêm constantes as resistências R_1 e R_2 , a variação do valor da resistência R_4 será igual à variação de resistência do extensómetro. Diz-se neste caso que, na medição da resistência, a ponte de Wheatstone recorre a um método de zero. O principal inconveniente deste processo de medição resulta precisamente da dificuldade em desenvolver um sistema, manual ou eléctrico, de precisão, que permita, em cada momento, o restabelecimento do equilíbrio da ponte.

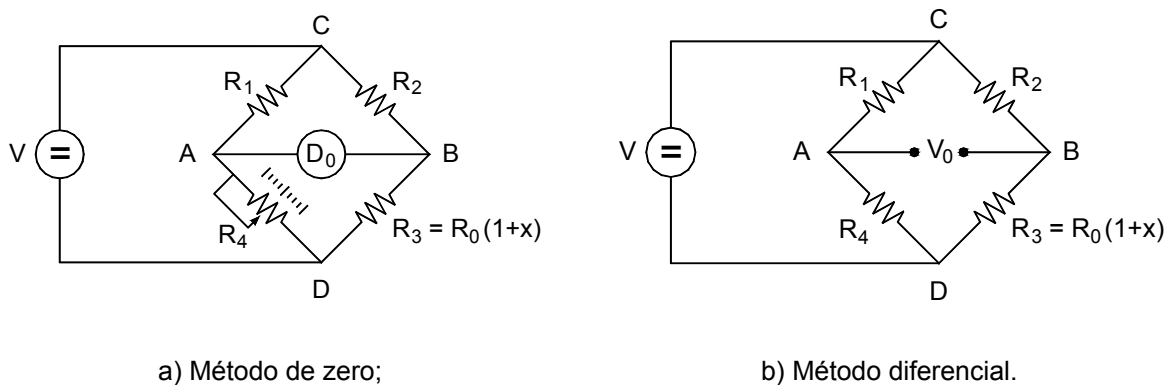


Figura 5.9 — Ponte de medição pelo método diferencial.

Um processo alternativo de medição, também baseado na ponte de Wheatstone, está representado na Figura 5.9 b). Em vez de se procurar o equilíbrio da ponte, mede-se a diferença de potencial entre os pontos A e B, ou a intensidade de corrente que percorre o braço central. No circuito representado o detector de zero é substituído por um detector capaz de medir essa diferença de potencial. Este processo permite obter um sinal eléctrico a partir do circuito da ponte, proporcional ao valor da variação da resistência do extensómetro, dada pela expressão (5.34). Este método de medição é considerado um método diferencial.

5.4.4 Obtenção das extensões a partir da ponte de Wheatstone

Uma vez descrito o circuito da ponte de Wheatstone, enquanto processo de medição da variação de resistência, coloca-se a questão de saber qual o efeito que a variação de resistência de um extensómetro tem no valor do sinal medido na ponte. As expressões são diferentes consoante o modo como os extensómetros são ligados à ponte e ainda consoante o tipo de alimentação. No texto que se segue admite-se que a ponte é alimentada a tensão de valor constante, sendo apresentadas as expressões relativas a alguns exemplos mais comuns de montagem dos extensómetros no circuito.

O primeiro exemplo, que é o mais elementar, está apresentado na Figura 5.10 em que se supõe uma variação de resistência em apenas um dos braços da ponte de valor x , mantendo-se de valor inalterado as restantes resistências. Ou seja, de acordo com a figura, R_3 passará a apresentar o valor:

$$R_3 = R_0(1 + x), \tag{5.37}$$

em que:

R_0 — é o valor de referência da resistência;

x — é o aumento da resistência, a partir do valor de referência.

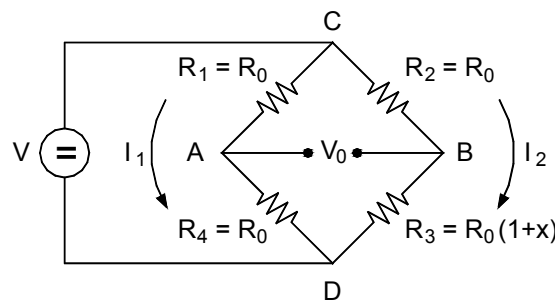


Figura 5.10 — Ligação de um extensómetro à ponte de Wheatstone com um braço activo.

O braço da ponte de medida onde está instalado o extensómetro sujeito a extensão, e por isso a variação de resistência, designa-se braço activo da ponte. Como neste caso apenas um braço da ponte está activo diz-se que o extensómetro está ligado em quarto de ponte. As restantes três resistências, uma vez que não estão sujeitas a qualquer deformação, admite-se que o seu valor de referência permanece constante ao longo da medição.

A diferença de potencial no braço central da ponte é obtida a partir da expressão (5.34), substituindo os valores das resistências R_1 a R_4 , pelos valores conhecidos, de acordo com a Figura 5.10:

$$V_0 = \frac{R_0 R_0(1+x) - R_0 R_0}{(R_0 + R_0)(R_0 + R_0(1+x))} V = \frac{x}{4 + 2x} V. \tag{5.38}$$

Em relação ao denominador da expressão (5.38), para valores pequenos de x pode admitir-se que:

$$2x \cong 0, \tag{5.39}$$

surgindo a expressão simplificada:

$$V_0 \cong \frac{x}{4} V, \quad (5.40)$$

ou ainda:

$$x \cong 4 \frac{V_0}{V}. \quad (5.41)$$

Substituindo a expressão (5.41) na expressão (5.24), virá:

$$\varepsilon \cong \frac{4 V_0}{G V}, \quad (5.42)$$

sendo G o factor de ganho do extensómetro, definido anteriormente.

Esta expressão permite relacionar a extensão de um extensómetro ligado em quarto de ponte, com o sinal de saída V_0 , a tensão de alimentação da ponte, suposta constante e de valor V , e o factor de ganho G do extensómetro.

Uma das vantagens da utilização da ponte de Wheatstone é a possibilidade de instalar extensómetros activos em mais do que um braço. Desde que devidamente posicionados na ponte de medida, podem ampliar o efeito da variação de extensão, ou seja, da variação da resistência, com o conseqüente aumento do sinal de saída. Procura deste modo obter-se um sistema de medição com maior acuidade.

Neste contexto, é apresentado na Figura 5.11, um exemplo de uma aplicação em que na medição é utilizado um circuito em ponte de Wheatstone com dois extensómetros activos. Precisamente porque dois dos quatro braços da ponte são activos, diz-se que foi feita uma montagem em meia ponte. No circuito, os extensómetros, cuja resistência vai variar na medição, estão instalados em dois braços adjacentes da ponte, admitindo-se que as resistências instaladas nos outros dois braços são de valor constante. O modelo que se pretende observar é uma consola, de secção transversal simétrica, encastrada num extremidade e livre na outra. Por acção da carga P , a barra sofrerá, em cada secção, alongamentos na face superior idênticos, aos encurtamentos experimentados pela face inferior. Os extensómetros estão posicionados numa mesma secção, um junto à face superior (braço BD do circuito de medição) e outro junto à face inferior (braço CB do circuito).

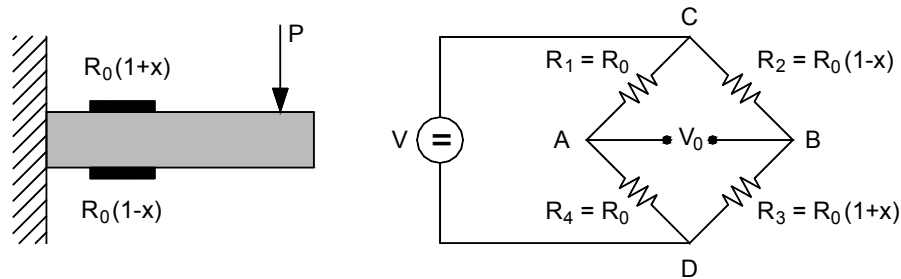


Figura 5.11 — Modelo sujeito à flexão simples: circuito em ponte de dois braços activos.

A diferença de potencial no braço central da ponte, obtém-se a partir da expressão (5.34), substituindo os valores conhecidos das resistências. De acordo com a Figura 5.11 pode então escrever-se:

$$V_0 = \frac{R_0 R_0 (1+x) - R_0 (1-x) R_0}{(R_0 + R_0)(R_0(1-x) + R_0(1+x))} = \frac{x}{2} V. \quad (5.43)$$

Este resultado, quando comparado com (5.40), permite concluir que, neste exemplo, a sensibilidade da ponte aproximadamente duplicou.

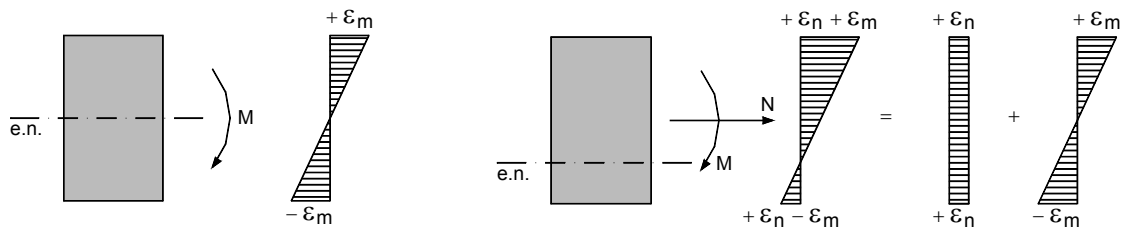
Substituindo a expressão (5.43) na expressão (5.24), obtém-se:

$$\varepsilon = \frac{2 V_0}{G V}, \quad (5.44)$$

sendo G o factor de ganho do extensómetro.

No circuito apresentado no exemplo da Figura 5.11, os extensómetros estão ligados em braços adjacentes da ponte, donde a variação das resistências no sinal de saída, têm efeitos opostos, ou seja, subtraem-se. Mas como a peça à qual os extensómetros estão aplicados, provoca variações de resistência iguais em valor absoluto mas de sinais contrários, na ponte de medição o seu efeito surge duplicado em valor absoluto.

Para melhor compreensão do exposto e demonstração das potencialidades deste método de medição, apresenta-se na Figura 5.12 a secção transversal instrumentada do modelo descrito anteriormente, mas agora submetido a duas acções distintas: (1) a primeira delas, idêntica à esquematizada na Figura 5.11, induzindo esforço de flexão simples; (2) a segunda, induzindo na secção flexão composta com tracção.



a) Secção sujeita a flexão simples;

b) Secção sujeita a flexão composta.

Figura 5.12 — Medição de extensões com circuito em ponte de dois braços activos.

No primeiro caso, o eixo neutro situa-se a meio da secção. Como são iguais e de sinal contrário as extensões junto às faces superior e inferior, também o são a variação de resistência dos extensómetros aí posicionados. De acordo com o circuito indicado na Figura 5.11, o efeito da variação de resistência na ponte de medida, que resulta da diferença entre a variação da resistência em cada um dos braços adjacentes, é neste caso duplicado. No segundo caso, além da deformação por flexão, a secção está sujeita a um alongamento uniforme, resultado do esforço axial de tracção N . Mais uma vez, de acordo com o circuito indicado na Figura 5.11, como os extensómetros estão instalados em braços adjacentes da ponte, o sinal medido é função da diferença das resistências, ou seja, das extensões. Verifica-se então, que o sinal de saída da ponte de medição, em ambos os casos, será o mesmo.

A ligação de extensómetros em meia ponte oferece diversas possibilidades. O exemplo representado na Figura 5.13 refere-se à medição da deformação longitudinal de um modelo, sujeito a um esforço axial de valor N , constituído por um material de coeficiente de Poisson conhecido de valor ν . Esta peça está instrumentada com dois extensómetros aplicados aproximadamente no mesmo ponto, um orientado longitudinalmente, na direcção principal de deformação máxima, e o outro na direcção que lhe é ortogonal. Os extensómetros estão ligados à ponte de Wheatstone em meia ponte, de acordo com o circuito indicado na figura. Ao ser aplicado o esforço axial N , a extensão transversal, medida por R_2 , relaciona-se com a extensão longitudinal, medida pelo extensómetro R_3 , através da expressão:

$$\varepsilon_t = -\nu\varepsilon_l, \tag{5.45}$$

onde:

ε_t — é a extensão transversal;

ε_l — é a extensão longitudinal;

ν — é o coeficiente de Poisson do modelo.

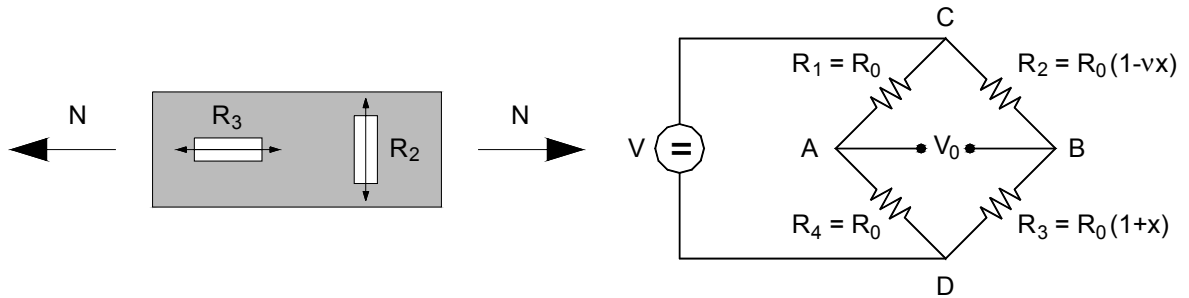


Figura 5.13 — Modelo sujeito à tracção simples: circuito em ponte de dois braços activos.

Substituindo na expressão (5.34) os valores das resistências, conforme a Figura 5.13, obtém-se:

$$V_0 = \frac{R_0 R_0 (1+x) - R_0 (1-\nu x) R_0}{(R_0 + R_0)(R_0 (1-\nu x) + R_0 (1+x))} V = \frac{x(1+\nu)}{4 + 2x(1-\nu)} V. \quad (5.46)$$

Admitindo que para pequenos valores de x ,

$$2x(1-\nu) \cong 0, \quad (5.47)$$

a expressão (5.46) pode simplificar-se, vindo:

$$V_0 = \frac{x(1+\nu)}{4} V, \quad (5.48)$$

Comparando esta expressão com a expressão (5.40), correspondente à montagem de um só extensómetro activo, verifica-se que aumentou a sensibilidade da medição pelo factor $(1+\nu)$. Naturalmente que, para se poder aproveitar o aumento de sensibilidade que este circuito confere deverá ser conhecido, com elevada precisão, o valor do coeficiente de Poisson do material que constitui o modelo.

Na Figura 5.14 representa-se de novo o exemplo da viga encastrada, mas onde são instalados, numa dada secção, pares de extensómetros, nas faces superior e inferior, todos eles orientados na direcção das máximas deformações. Admite-se que por acção da carga P , os alongamentos verificados junto à face superior são iguais em valor absoluto, aos encurtamentos verificados junto à face inferior. A montagem dos extensómetros no circuito da ponte é a representada na Figura 5.14. Os extensómetros, que sob a acção da carga P , sofrem extensões do mesmo sinal, são instalados em braços opostos da ponte, enquanto que os extensómetros sujeitos a extensões de sinal contrário,

estão instalados em braços adjacentes. Esta ligação dos extensómetros à ponte de Wheatstone, em que todos os braços são activos, é designada ligação em ponte completa.

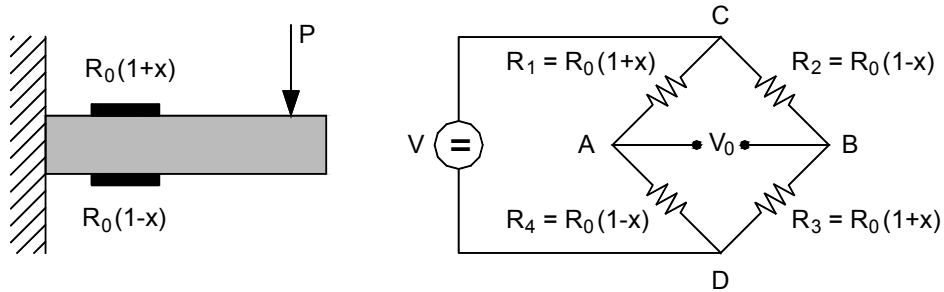


Figura 5.14 — Modelo sujeito à flexão simples: circuito em ponte de quatro braços activos.

De modo idêntico ao efectuado anteriormente, pode substituir-se na expressão (5.34) os valores das resistências de acordo com o indicado na Figura 5.14, surgindo a expressão:

$$V_0 = \frac{R_0(1+x)R_0(1+x) - R_0(1-x)R_0(1-x)}{(R_0(1+x) + R_0(1-x))(R_0(1-x) + R_0(1+x))} V = xV. \quad (5.49)$$

Da análise desta expressão conclui-se que, na medição das extensões de uma peça sujeita à flexão simples, com extensões nas faces superior e inferior iguais e de sinal contrário, a ligação em ponte completa aumenta a sensibilidade do sistema de medição quatro vezes, quando comparada com a ligação em quarto de ponte (conferir com a expressão (5.40)).

Nos exemplos de ligação de extensómetros à ponte de Wheatstone apresentados supôs-se que a ponte é alimentada com uma tensão V de valor constante e que é medida a diferença de potencial V_0 no braço central. Alternativamente a ponte pode ser alimentada com uma intensidade de corrente I de valor constante. O Quadro 5.1 resume o sinal de saída da ponte de Wheatstone, para algumas configurações dos braços activos no circuito, quando a ponte é alimentada a tensão constante e quando é alimentada a corrente de intensidade constante.

5.4.5 Ligação de extensómetros em quarto de ponte

Nas aplicações correntes, os extensómetros estão aplicados a uma certa distância da ponte de medida, sendo as ligações feitas através de fios condutores. A distância do extensómetro à ponte de medida, as características do fio condutor e o modo de ligação dos extensómetros, afectam a medição, devendo por isso ser conhecidos e quantificados os erros daí resultantes. Como adiante se verá, esta questão interessa particularmente aos extensómetros ligados em quarto de ponte.

$$R_3 = R_0 + 2R_f, \quad (5.50)$$

em que R_f representa a resistência de cada um dos fios condutores.

Para ilustrar este efeito, considere-se no circuito representado na Figura 5.15, que o extensómetro tem uma resistência $R_0=350\Omega$, e que os fios de ligação são de cobre, com $0,5\text{mm}^2$ de secção, que à temperatura ambiente apresentam a resistência de $78,4\Omega/\text{km}$. Se o extensómetro estiver a 10m da ponte de medida, a resistência é dada por:

$$R_f = 10 \times 0,0784 \cong 0,784\Omega. \quad (5.51)$$

Admita-se ainda as resistências $R_1=R_2=R_4=350\Omega$ e de valor constante. De acordo com a expressão (5.34), o sinal que a ponte acusará poderá ser calculado do seguinte modo:

$$\frac{V_0}{V} = \frac{350 \times (350 + 2 \times 0,78) - 350 \times 350}{(350 + 350) \times (350 + 350 + 2 \times 0,78)} \cong 1,14 \times 10^{-3} V/V = 1,14 \text{mV}/V. \quad (5.52)$$

Se o factor de ganho do extensómetro G for igual a 2,0, de acordo com a expressão (5.42), poderá ser calculada a extensão ε correspondente, sendo igual a:

$$\varepsilon = \frac{4}{2,0} \times 1,14 \times 10^{-3} = 2,281 \times 10^{-3} \text{m}/\text{m} = 2280 \times 10^{-6} \text{m}/\text{m} = 2280 \mu\varepsilon, \quad (5.53)$$

que conforme se pode observar, é de valor não desprezável. Este facto pode, contudo, não ser condicionante, desde que o sistema tenha capacidade de, ou reequilibrar a ponte, ou fazer a medição numa outra gama de valores.

Uma segunda consequência da existência de fios de ligação do extensómetro à ponte de medição advém do efeito que a variação de temperatura tem sobre estes. De facto, a variação de temperatura pode alterar significativamente o valor da resistência dos fios condutores e por consequência do braço no qual estão instalados. Não existem muitas possibilidades de selecção para o metal do fio condutor: (1) os metais cuja resistência é pouco sensível à variação da temperatura, como o constantan, apresentam como inconveniente uma elevada resistência; (2) os metais com baixa resistência, como o cobre, apresentam elevada sensibilidade aos efeitos da temperatura.

Na continuação do exemplo apresentado anteriormente determina-se o efeito que a diminuição de temperatura de 10°C tem na variação da resistência do braço da ponte. Conforme será referido no Capítulo 6, o coeficiente de temperatura da resistência do cobre, para o intervalo de temperatura compreendido entre 0°C e 100°C , é aproximadamente constante e de valor, $\alpha=0,0043\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$. Os fios

de ligação do exemplo em apreço têm, cada um deles, à temperatura de referência, uma resistência de $R_f=0,78\Omega$. Se a temperatura diminuir de 10°C , este valor passará a ser dado por:

$$R_f = 0,78 + 0,0043 \times 10 \times 0,78 \cong 0,83\Omega . \quad (5.54)$$

Mais uma vez, de acordo com a expressão (5.34), pode ser calculado o novo valor detectado na ponte de Wheatstone, dado por:

$$\frac{V_0}{V} = \frac{350 \times (350 + 2 \times 0,83) - 350 \times 350}{(350 + 350) \times (350 + 350 + 2 \times 0,83)} \cong 1,19 \times 10^{-3} V / V = 1,19 mV / V , \quad (5.55)$$

que para o factor de ganho do extensómetro $G=2,0$, e de acordo com a expressão (5.42), corresponde a extensão:

$$\varepsilon = \frac{4}{2,0} \times 1,19 \times 10^{-3} = 2,380 \times 10^{-3} m / m = 2380 \times 10^{-6} m / m = 2380 \mu\varepsilon . \quad (5.56)$$

Comparando este valor com o obtido anteriormente, verifica-se que neste circuito, o efeito da variação de temperatura de 10°C nos cabos, introduz um erro na medição de aproximadamente $100\mu\varepsilon$. Repare-se ainda que este erro seria agravado se, em vez de se utilizar um extensómetro de 350Ω se utilizasse um de menor resistência, como por exemplo, 120Ω .

Nas ligações em ponte completa, desde que os fios sejam do mesmo material, tenham o mesmo comprimento e estejam sujeitos às mesmas variações de temperatura, as variações de resistência atrás referidas são comuns aos quatro braços da ponte, anulando-se por isso o seu efeito. O mesmo acontece nas ligações em meia ponte, quando são usados braços adjacentes. O efeito da variação de temperatura nos fios só poderá constituir um problema, nas restantes ligações em meia ponte, e nas ligações em quarto de ponte.

Nas situações em que só um braço da ponte é activo, o método de Siemens permite resolver esta questão. Este método propõe a adopção de um dos circuitos representados na Figura 5.16, em que o extensómetro é ligado à ponte através de três fios condutores, com a condição de que os fios 1 e 3 sejam do mesmo material, com a mesma secção e o mesmo comprimento, e estejam sujeitos às mesmas variações de temperatura. A opção entre uma ou outra solução, bem como as características do fio 2 não são relevantes, desde que não haja fluxo de corrente no braço central da ponte, o que é aliás comum, nos actuais equipamentos de aquisição. O efeito da alteração da resistência nos fios condutores 1 e 3 é anulado por estarem em braços adjacentes da ponte, terem o mesmo valor e o mesmo sinal.

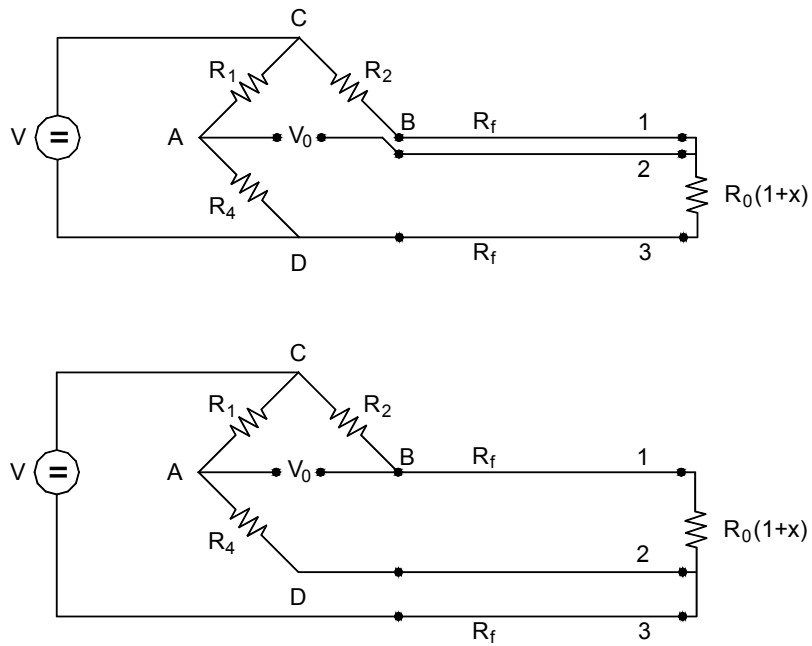


Figura 5.16 — Ligação de um extensómetro em quarto de ponte com três fios.

A resistência nominal do braço activo da ponte, passa a ser dada pela expressão:

$$R_3 = R_0 + R_f. \quad (5.57)$$

Um problema contudo subsiste que é a atenuação do sinal. De facto, a variação de resistência do extensómetro em resultado de uma extensão que se pretende medir é apenas uma parcela da resistência total do braço activo da ponte. Para exemplificar, retome-se a ligação do extensómetro a dois fios conforme representado na Figura 5.15.

Atendendo à expressão (5.50) relação entre a variação da resistência no braço activo e a sua resistência total é dada pela expressão:

$$\frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{xR_0}{R_0 + 2R_f} = \frac{x}{1 + \frac{2R_f}{R_0}}, \quad (5.58)$$

onde xR_0 representa a variação de resistência do extensómetro.

Ou ainda:

$$\frac{\Delta R_3}{R_3} = x(1 - P), \quad (5.59)$$

onde P representa o factor de perda de medição (Dally e Riley, 1991), e é dado por:

$$P = \frac{\frac{2R_f}{R_0}}{1 + \frac{2R_f}{R_0}} \quad (5.60)$$

Se em vez de uma ligação a dois fios se optar pela ligação dos extensómetros a três fios, recorrendo a qualquer um dos circuitos representados na Figura 5.16, atendendo à expressão (5.58), a perda na medição devida à resistência dos fios passa a ser dada pela expressão (Dally e Riley, 1991):

$$P = \frac{\frac{R_f}{R_0}}{1 + \frac{R_f}{R_0}}, \quad (5.61)$$

o que corresponde a uma redução significativa do erro da medição.

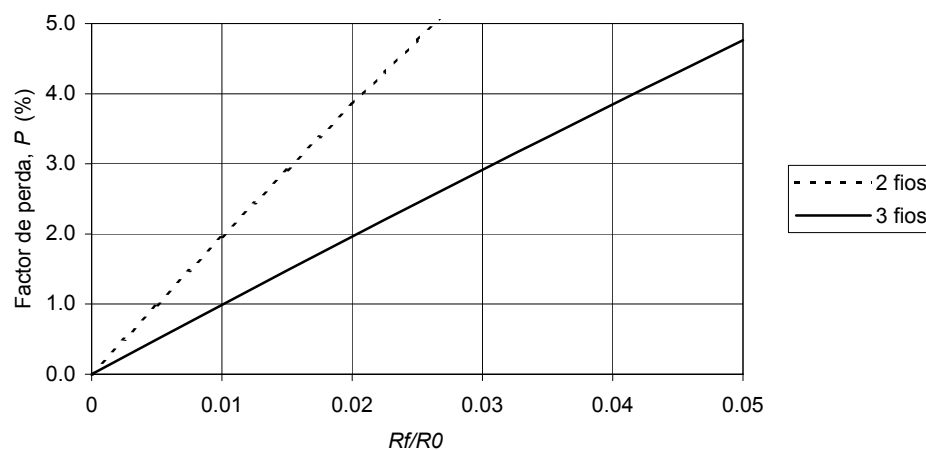


Figura 5.17 — Factor de perda nas ligações em quarto de ponte, a dois e a três fios.

A Figura 5.17 representa graficamente o factor de perda dado pelas expressões (5.60) e (5.61) para ligação de extensómetros em quarto de ponte a dois fios e a três fios, respectivamente, em função da relação existente entre a resistência do fio e do extensómetro. Da sua análise pode concluir-se que a ligação de extensómetro com dois fios tem perdas significativamente superiores quando comparadas com as que se verificam quando o extensómetro é ligado com três fios. Nas aplicações práticas procura limitar-se esta perda a 2% (Dally e Riley, 1991), impondo-se por isso relações de R_f/R_0 inferiores a 0,01 e a 0,02 para as ligações a dois e a três fios, respectivamente. Nas situações em que é necessário utilizar fios muito compridos, a adopção de extensómetros de elevada resistência reduzirá a relação R_f/R_0 , e, por consequência, o factor de perda.

Nas aplicações em que a resistência do fio é conhecida, o valor do sinal de saída da ponte de medida pode ser corrigido, através da expressão (Measurements Group, TN-514):

$$V_{0, \text{corrigido}} = \frac{V_0}{(1 - P)}, \quad (5.62)$$

em que:

$V_{0, \text{corrigido}}$ — é o valor corrigido do sinal de saída na ponte;

V_0 — é o valor lido na ponte;

P — é o factor de perda.

Como o valor da extensão está directamente relacionado com o sinal de saída e com o factor de ganho do extensómetro (conferir, por exemplo, com a expressão (5.42)), o procedimento corrente nos casos em que é necessário proceder a esta correcção, consiste em fazer incidir essa correcção sobre o factor de ganho, através da expressão:

$$G_{\text{corrigido}} = G(1 - P), \quad (5.63)$$

em que:

G — é o factor de ganho do extensómetro fornecido pelo fabricante;

$G_{\text{corrigido}}$ — é o factor de ganho após a correcção;

P — é o factor de perda.

Na determinação do factor de perda, conforme foi exposto, apenas foram tidas em conta as perdas devidas à resistência dos fios condutores. Existem, contudo, outras perdas não desprezáveis que estão relacionadas com a resistência das próprias ligações, nomeadamente, as ligações ao sistema de aquisição e de eventuais emendas de fios. Estão desenvolvidas técnicas, especialmente dedicadas à determinação do factor de perda da instalação (Measurements Group, TN-514), que permitem ter em conta todo este conjunto de perdas.

Em resumo, a ligação de extensómetros em quarto de ponte com dois fios não é de todo recomendada fundamentalmente porque:

- 1) introduz um importante desvio na ponte de medição;
- 2) as variações de temperatura sobre os cabos de ligação introduzem erros na medição;

- 3) e porque a resistência dos cabos de ligação reduzem a sensibilidade da medição.

A ligação mais recomendada para extensómetros em quarto de ponte é a ligação a três fios, apresentando, comparativamente com a anterior, como vantagens:

- 1) a manutenção do equilíbrio da ponte;
- 2) a compensação automática do efeito da temperatura sobre os cabos;
- 3) a redução da perda de sensibilidade, quando comparada com a ligação a dois fios.

Conforme foi visto anteriormente, o desequilíbrio inicial da ponte pode ser equilibrado fisicamente no circuito de medição, alterando o valor da resistência no braço oposto da ponte, ou pode ser feito matematicamente, subtraindo a cada leitura, o valor inicial. O efeito da variação de temperatura nos cabos de ligação é uma questão que só será anulada com a ligação dos extensómetros em quarto de ponte a três fios. A perda de sensibilidade da medição, não sendo eliminada na ligação a três fios é, pelo menos, minorada, existindo técnicas que permitem quantificar, em cada caso, esta perda.

5.4.6 Efeito da variação da temperatura sobre os extensómetros

Numa situação ideal, a resistência de um extensómetro só deveria variar com as deformações impostas à peça à qual está aplicado, pois é a partir destas extensões que se podem estimar as tensões que lhe estão associadas. Contudo, verifica-se uma enorme sensibilidade destes sensores à variação da temperatura, que provocam a designada deformação térmica aparente, fundamentalmente por dois motivos:

- a) Devido à resistividade eléctrica ρ , da malha do extensómetro que varia com a temperatura;
- b) Por não serem iguais os coeficientes de dilatação térmica da malha do extensómetro e do material ao qual está aplicado.

O extensómetro, desde que devidamente instalado, acompanha integralmente as deformações impostas ao material a ensaiar, em particular, acompanha a deformação térmica não impedida do material. Se o coeficiente de dilatação térmica da malha do extensómetro e do material a ensaiar forem diferentes, a variação de resistência acusada pelo extensómetro será proporcional a essa diferença.

Além disso, a variação de temperatura num dado material provoca deformações idênticas em ambas as direcções, enquanto que o factor de ganho é obtido por calibração em ensaios em que a deformação é aplicada apenas numa direcção. Daí a necessidade de se ter em conta a sensibilidade transversal do extensómetro.

Os melhores fabricantes de extensómetros fornecem, para cada extensómetro, as expressões respectivas que permitem corrigir este efeito da temperatura. Para a sua utilização será necessário medir, junto de cada extensómetro, a temperatura a que este está sujeito, e proceder à correcção numérica dos valores indicados pela ponte de medida. De acordo com os parâmetros enunciados, que afectam a deformação aparente, estas expressões dependem do material utilizado no fabrico do extensómetro e do material que constitui o modelo, ao qual está aplicado. Estas expressões têm ainda em linha de conta, entre outros factores, a sensibilidade transversal do extensómetro.

Nas situações em que apenas um extensómetro é activo, a compensação do efeito da temperatura sobre este extensómetro pode ser conseguida através de um segundo extensómetro, designado extensómetro compensador da temperatura, instalado num braço adjacente da ponte, conforme se ilustra na Figura 5.18. Este segundo extensómetro de compensação deve:

- a) ser da mesma série de fabrico do activo;
- b) estar aplicado numa amostra, colocada nas proximidades do modelo a ensaiar, de modo a experimentar as mesmas variações de temperatura;

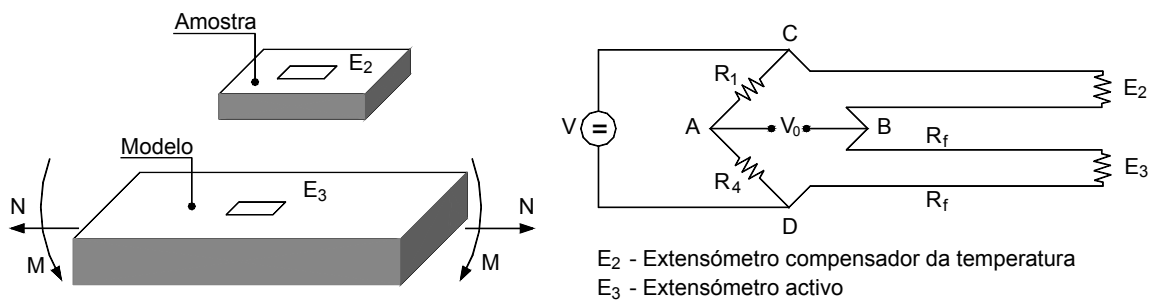


Figura 5.18 — Circuito em meia ponte para compensação da temperatura.

Além disso:

- a) o extensómetro activo e o extensómetro compensador da temperatura devem ser objecto dos mesmos procedimentos de instalação;
- b) a amostra, na qual está aplicado o extensómetro compensador da temperatura, não deve estar sujeito a qualquer outra acção além da variação de temperatura;
- c) os fios de ligação dos extensómetros, activo e de compensação, devem ser do mesmo material, ser do mesmo comprimento, ter o mesmo percurso desde o extensómetro até à ponte de medida, de modo a que, tanto quanto possível, também os fios, estejam sujeitos às

mesmas variações de temperatura e, por consequência, às mesmas variações de resistência por efeito dessa variação de temperatura.

Como estão em braços adjacentes da ponte, o sinal de saída está directamente relacionado com a diferença de extensões que estes dois extensómetros experimentam, ou seja, às extensões totais experimentadas pelo extensómetro activo, são subtraídas:

- a) a extensão aparente, devido à variação de resistência em resultado da variação de temperatura sobre o extensómetro;
- b) a extensão resultante da deformação livre da amostra, devido à variação da temperatura, ou seja, as extensões não impedidas.

O valor da extensão assim medida, inclui a extensão devida às acções mecânicas aplicadas à peça e a parcela da extensão impedida resultante da variação da temperatura. Adoptando o circuito indicado na Figura 5.18, a extensão medida, é aquela que está directamente relacionada com a tensão a que o material a ensaiar está sujeito.

O objectivo da compensação do efeito da temperatura em extensómetros de resistência pode ser explicado com recurso ao exemplo apresentado na Figura 5.19 em que dois modelos, constituídos pelo mesmo material, sujeitos apenas a uma mesma variação de temperatura de valor idêntico em ambos os casos, mas com condições de apoio distintas. O primeiro deles está livre de se deformar enquanto que o segundo tem a deformação longitudinal impedida. Na medição das extensões em cada um dos modelos é adoptado o circuito indicado na Figura 5.18.

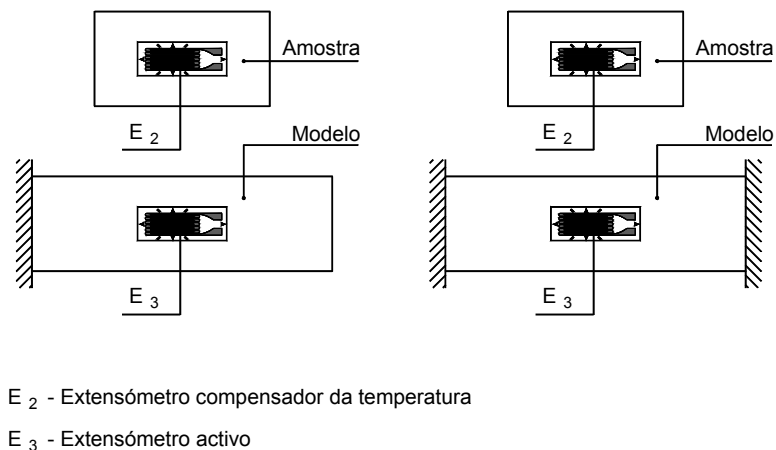


Figura 5.19 — Dois modelos sujeitos a variação de temperatura.

No primeiro caso, sob o efeito da variação de temperatura, ambos os extensómetros E_2 e E_3 apresentam a mesma variação de resistência. Daí que a variação do sinal de saída na ponte seja zero.

No segundo caso, sob o efeito da mesma variação de temperatura, verifica-se que:

- a) a variação de resistência, devido à variação da resistividade em ambos os extensómetros E_2 e E_3 é a mesma, anulando-se por isso o seu efeito na ponte de medida;
- b) a extensão experimentada por cada extensómetro é diferente e essa diferença corresponde exactamente à deformação que o modelo experimentaria se estivesse livre de se deformar; corresponde, por isso, à deformação impedida, ou seja, a deformação que provoca esforços no modelo.

Conclui-se que, em ambos os exemplos, o sinal de saída está directamente relacionado com a tensão que a variação de temperatura induz na peça: (1) zero no primeiro caso; (2) diferente de zero no segundo.

Este método é muito eficaz para eliminar os efeitos indesejáveis da temperatura sobre os extensómetros. Apresenta contudo alguns inconvenientes resultantes sobretudo das premissas que lhe estão subjacentes. Nomeadamente no que diz respeito às regras de instalação do extensómetro compensador e dos fios de ligação. Além de que obriga à duplicação do número de extensómetros nos pontos de medição. Na verdade, o extensómetro compensador funciona neste esquema como um sensor de temperatura, apresentando as mesmas particularidades de instalação e de leitura que um sensor de temperatura.

Mais recentemente surgiram os designados extensómetros auto-compensados para os efeitos da temperatura, que evita a utilização deste segundo extensómetro não activo. O objectivo principal destes extensómetros é de eliminar, tanto quanto possível, numa dada gama de temperatura, os efeitos térmicos sobre o extensómetro activo, dispensando a aplicação de um extensómetro compensador. A auto-compensação para o efeito da temperatura é conseguida através da manipulação das características metalúrgicas das ligas que constituem a malha do extensómetro, conferindo-lhe uma variação de resistência, sob o efeito da variação de temperatura, muito reduzida, desde que aplicados a um material com coeficiente de dilatação térmica idêntico àquele para o qual a liga foi projectada (Measurements Group, TN-504-1). A auto-compensação será eficaz desde que a medição se desenvolva dentro de uma gama de temperatura definida pelo fabricante.

Contudo, ou porque as amplitudes térmicas verificadas excedam os valores definidos como aceitáveis para a auto-compensação, ou porque se pretenda maior acuidade na leitura, a correcção do sinal de saída da ponte de medição pode ser feita. Para o efeito podem ser usadas qualquer uma das

técnicas referidas anteriormente, quer através da utilização de expressões matemáticas, quer através do circuito em meia ponte representado na Figura 5.18.

5.4.7 Fontes de erro na medição

A temperatura é uma fonte de interferência por diversas razões. Afecta a resistividade do material condutor, a sua dimensão e as dimensões do material ao qual está aplicado. Uma vez um extensómetro instalado qualquer variação de temperatura provocará alteração ao valor da resistência mesmo antes de qualquer deformação do elemento. Em extensómetros metálicos esta variação da resistência pode facilmente atingir os $50\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (Pallás-Areny e Webster, 1991). Conforme foi já referido este efeito coloca-se sobretudo na ligações em quarto de ponte. Para estes casos foram referidas duas técnicas: a utilização de um extensómetro compensador da temperatura, e a selecção de extensómetros constituídos por ligas que os tornam auto-compensados para o efeito da temperatura.

O auto-aquecimento pode constituir outra fonte de interferência na medição. Para medir a resistência de um extensómetro, é necessário que este seja percorrido por uma corrente eléctrica. A dissipação de energia daí decorrente resulta no seu aquecimento. A máxima corrente para um extensómetro metálico deverá ser de 25mA, se o material ao qual está aplicado for constituído por um bom condutor de calor, como um metal, e de 5mA se é aplicado a um material pouco condutor, como o plástico ou a madeira. A energia libertada aumenta com a área do extensómetro e pode variar entre $770\text{mW}/\text{cm}^2$ até $150\text{mW}/\text{cm}^2$, dependendo do material de suporte. Nos extensómetros semicondutores, a máxima energia dissipada é, em geral, de $250\text{mW}/\text{cm}^2$ (Pallás-Areny e Webster, 1991).

Uma outra fonte de interferência é a força termoeléctrica que surge na junção entre metais distintos. Se um extensómetro é alimentado por uma corrente contínua, isto pode produzir um acréscimo de tensão que é adicionável à variação de tensão devida à deformação do próprio sensor. As forças termoeléctricas podem ser detectadas invertendo a polaridade da alimentação, em particular, se estas estiverem presentes, a tensão de saída será alterada. As forças termoeléctricas podem ser evitadas, por exemplo, através da selecção de materiais apropriados ou alimentando os extensómetros com corrente alternada (Pallás-Areny e Webster, 1991).

A medição de deformações é frequentemente realizada na presença de campos eléctricos e/ou magnéticos que podem introduzir ruído eléctrico nos sinais medidos. Se não são controlados, a presença do ruído pode conduzir a resultados incorrectos e, nos casos mais graves, pode ocultar parcial ou totalmente o sinal resultante das extensões. Existem diversas técnicas conducentes ao controlo do nível de ruído e de maximização da relação sinal/ruído (Measurements Group, TN-501-2). Nestas técnicas recomenda-se, por exemplo, a selecção de cabos com malha, devidamente ligados à terra, ou de cabos com fios entrelaçados e a selecção de equipamento de aquisição de qualidade.

Nas situações mais severas pode ainda recorrer-se a extensómetros especiais, em que a protecção se estende à própria malha do extensómetro.

Uma selecção deficiente do extensómetro pode constituir uma fonte de erro na medição. Os extensómetros devem, idealmente, ser tão pequenos quanto possível, para que a deformação possa ser referida a um dado ponto. Na prática, as dimensões são finitas, e assume-se que o ponto de medida é no centro geométrico do extensómetro. Contudo, quando o material onde vai ser aplicado o extensómetro é não homogéneo, como o betão, as suas dimensões devem ser tais que evitem imprecisões devidas à sua descontinuidade.

A distância da malha do extensómetro à superfície da peça é particularmente importante em peças de reduzida espessura, com secções sujeitas a elevados gradientes de deformação. A espessura da cola utilizada na instalação do extensómetro, a somar à espessura do próprio extensómetro, afastam o ponto de medida da face do elemento. A selecção de rosetas com malhas sobrepostas agravam este efeito, além de que, nesta opção, os extensómetros não estão todos exactamente à mesma distância da face do elemento.

Existem outras causas que podem afectar o valor da medição, e que estão directamente relacionadas com a instalação do extensómetro, nomeadamente, a colagem deficiente ou o acabamento irregular da superfície da peça, a má orientação do extensómetro, as características da cola e a eficiência das camadas de protecção ambiental.

Não obstante as limitações referidas, os extensómetros de resistência são muito utilizados na observação de estruturas, principalmente devido às reduzidas dimensões, à elevada linearidade na resposta e ao custo acessível.

5.4.8 Extensómetros de aplicar à superfície

Os extensómetros de aplicar à superfície são os mais comuns, e estão especialmente dedicados à aplicação em laboratório ou em obra sobre diversos materiais estruturais, como, por exemplo, o aço, a madeira, os materiais compósitos e o betão. Neste último caso, sempre que possível, devem ser preferidos os extensómetros de embeber no betão, adiante referidos.

Nos extensómetros de aplicar à superfície colocam-se duas questões relevantes: a selecção do extensómetro e as técnicas de instalação.

Na selecção do extensómetro a aplicar devem ser tido em conta os seguintes aspectos:

- a) a liga constituinte do extensómetro, que pode ser condicionada pelo campo de medida das deformações a medir e pela temperatura a que vai estar sujeito;

- b) a base, que é o material de suporte da malha do extensómetro, distinguindo-se essencialmente, a poliamida, a fibra de vidro reforçada e o metal;
- c) o comprimento, a largura e a forma da malha do extensómetro;
- d) a auto-compensação de temperatura pretendida, função do material ao qual vai ser aplicado;
- e) o valor da resistência do extensómetro.

No Quadro 5.2 indicam-se algumas das configurações mais comuns de extensómetros existentes no mercado. Distinguem-se os extensómetros uniaxiais que medem a extensão apenas numa direcção e as rosetas que medem a extensão em duas ou mais direcções. A utilização destas últimas permite a determinação do estado plano de deformação num ponto, através de expressões adaptadas a cada tipo de roseta (Branco, 1990).

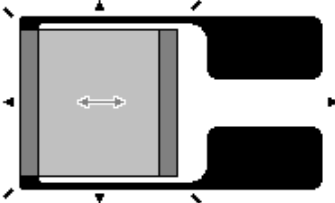
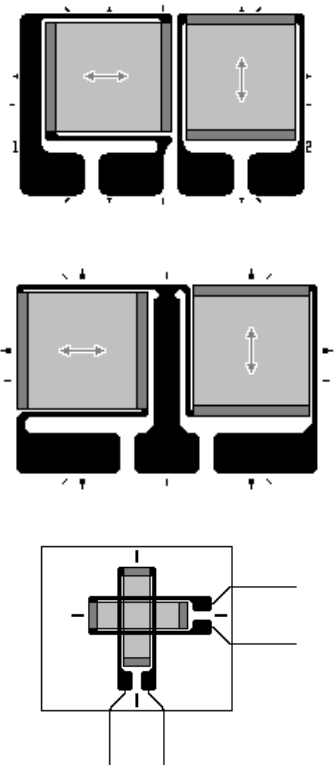
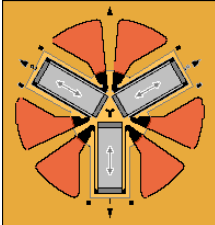
No que diz respeito às dimensões, a malha de um extensómetro pode ter entre 0,2mm a 150mm de comprimento e um campo de medida que pode ir de $1\mu\epsilon$ até $40\,000\mu\epsilon$. Os valores mais correntes da resistência são de 120Ω ou 350Ω , mas em aplicações específicas pode ir até $5\,000\Omega$.

No que diz respeito às técnicas de aplicação, elas dependem de numerosos factores, de entre os quais se salienta:

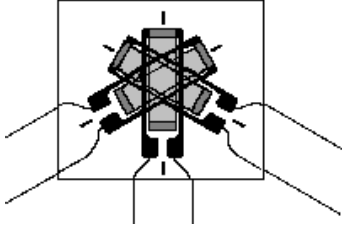
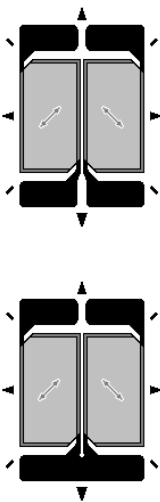

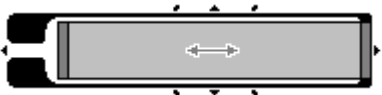
- a) o material sobre o qual o extensómetro vai ser aplicado, que determinam as técnicas de preparação da superfície;
- b) o tipo e dimensões do extensómetro a aplicar, em particular se se trata de um extensómetro de colar ou de soldar à superfície;
- c) o período de tempo durante o qual vão ser feitas medições, que determina, por exemplo o tipo de cola a utilizar;
- d) as condições de agressividade do meio ambiente, que determina o tipo de protecção ao extensómetro depois de aplicado.

A diversidade de produtos existentes no mercado, quer de extensómetros quer de acessórios de aplicação, e a especificidade de cada um deles, conduz a que cada fabricante tenha desenvolvido as suas próprias regras de selecção de extensómetros e as técnicas de aplicação que lhe estão associadas.

Quadro 5.2 — Configurações mais frequentes de extensómetros.

	<p>O exemplo mais simples é o extensómetro uniaxial para medição de extensões em apenas uma direcção.</p>
	<p>Os esquemas ao lado representam rosetas biaxiais com duas grelhas perpendiculares, formando 0° entre si, também designadas rosetas T. No primeiro caso, a medição da deformação em cada uma das duas direcções é independente.</p> <p>No segundo caso, as resistências estão ligadas em série, medindo-se a soma das deformações nas direcções respectivas. Se esta informação for suficiente, apresenta como principal vantagem a economia no número de canais de leitura.</p> <p>O extensómetro apresentado no terceiro caso, também permite medir, separadamente, as deformações em cada uma das duas direcções, com uma diferença em relação aos anteriores. Enquanto que, nos dois primeiros exemplos, as malhas estão num mesmo plano, neste caso, as malhas estão sobrepostas. A sua utilização pode ser vantajosa quando se pretende determinar as extensões ortogonais, tanto quanto possível, no mesmo ponto. Entre outros inconvenientes, apresenta-se o facto de as duas malhas do extensómetro não estarem exactamente à mesma distância da face do elemento ao qual está aplicado, podendo por isso, introduzir erros de leitura.</p>
	<p>A roseta de três elementos, representada ao lado, possui três malhas independentes, cuja orientação permite fazer medição da deformação num dado ponto, nas três direcções, rodadas de 120° entre si. São designadas rosetas em triângulo ou rosetas Delta. Estão também disponíveis no mercado, rosetas com três ou com quatro malhas, rodadas de 45°, também designadas rosetas em estrela.</p>

Quadro 5.2 — Configurações mais frequentes de extensómetros (continuação).

	<p>Na roseta de três elementos, as malhas podem estar no mesmo plano, ou serem sobrepostas, mantendo-se válidas as considerações feitas anteriormente, sobre as vantagens e inconvenientes desta solução.</p> <p>A medição independente em cada uma das três direcções torna possível a determinação das deformações principais e respectivas direcções.</p>
	<p>A geometria particular destes extensómetros permite a medição de extensões em direcções perpendiculares. As malhas estão frequentemente ligadas em série, para aplicação em ligações em meia ponte, permitindo obter directamente as deformações por corte.</p>
	<p>Existe também uma grande variedade de extensómetros desenvolvidos para aplicações específicas. Por exemplo, para determinação de tensões residuais, a Micro-Measurements Division, desenvolveu o extensómetro representado ao lado, o equipamento e o método que lhe está associado. Após a instalação do extensómetro é medida a deformação em cada uma das três direcções, devido à abertura de um orifício no provete na zona central do sensor. Foram desenvolvidas expressões que relacionam o valor medido com o valor da tensão instalada no material.</p>
	<p>Para aplicação à superfície de elementos de betão, são indicados extensómetros de dimensões apreciáveis, cuja malha pode ter comprimentos até 100mm.</p>

5.4.9 Extensómetros de embeber no betão

Na área das estruturas de engenharia civil as aplicações dos extensómetros são vastas e vão desde a medição em laboratório sobre modelos reduzidos até à observação em obra de estruturas reais. Os extensómetros de colar estão indicados para a generalidade dos materiais estruturais, como o aço, o betão, os materiais compósitos e a madeira. Contudo, no caso particular das estruturas de betão, será sempre preferível utilizar os extensómetros de embeber na massa de betão que apresentam inúmeras vantagens de entre as quais se salienta a protecção mecânica do sensor após a betonagem, a medição da extensão numa zona mais representativa da secção e a facilidade de instalação em obra. Aliás, a experiência tem demonstrado que, para observações a longo prazo de extensões, os instrumentos de medição devem ser preferencialmente instalados no interior do betão. As medições realizadas à superfície, perfeitamente satisfatórias em laboratório, raramente fornecem resultados com precisão aceitável no campo, mesmo para ensaios de curta duração. Este facto deve-se fundamentalmente ao efeito da variação de temperatura, a pequenas fissuras existentes na superfície de betão e a outros efeitos superficiais.

A Figura 5.20 apresenta um extensómetro de embeber no betão, da série EGP, produzido pela Measurements Group. A malha do extensómetro é constituída por uma liga de cromo e níquel com 100mm de comprimento activo. O valor da resistência pode ser de 120Ω ou de $350\Omega \pm 0,8\%$ a 24°C de temperatura. O campo de medição é de $\pm 0,5\%$, ou seja, $\pm 5\,000\mu\epsilon$. O intervalo de temperatura em que o extensómetro pode funcionar é de -45°C e $+55^\circ\text{C}$. Possui ainda um sistema de auto-compensação de temperatura, minimizando os seus efeitos sobre as medições, que é mais eficiente no intervalo compreendido entre $+15^\circ\text{C}$ e $+40^\circ\text{C}$. O revestimento exterior, de dimensões $130\text{mm} \times 17\text{mm} \times 10\text{mm}$, é constituído por um polímero de superfície rugosa, com vista ao melhoramento das características de aderência. Este revestimento permite a transferência das deformações do betão para a malha do extensómetro, conferindo-lhe simultaneamente a robustez mecânica indispensável às fases de instalação e betonagem e protecção à humidade e ao ataque químico do meio envolvente.



Figura 5.20 — Extensómetro de embeber no betão.

Com vista às aplicações em obra, a robustez mecânica pode ser melhorada com a aplicação de uma armação em aço, como se ilustra na Figura 5.21. Este sistema de protecção amortece o choque dos inertes de dimensões mais apreciáveis durante a fase de betonagem e impede o contacto directo do vibrador com o extensómetro. Uma vez preparado em laboratório tem ainda a vantagem de facilitar a sua aplicação em obra, e uma vez que aumenta as dimensões do sensor chama mais a atenção da sua presença em obra.

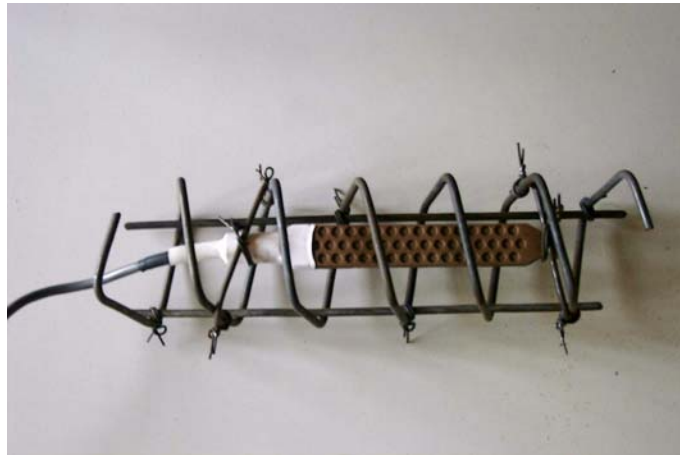


Figura 5.21 — Protecção mecânica adicional do extensómetro.

Na Figura 5.22 apresenta-se um exemplo de instalação em obra de uma roseta realizada com extensómetros de resistência eléctrica de embeber no betão.



Figura 5.22 — Aplicação em obra de uma roseta de extensómetros.

5.4.10 Sensores baseados em extensometria de resistência

As vantagens da utilização de extensómetros de resistência eléctrica para medição de deformações, de que se salientam as suas reduzidas dimensões, a sua elevada acuidade e a simplicidade dos sistemas de aquisição, conduziu à sua difusão no desenvolvimento dos mais diversos instrumentos de medição, nomeadamente células de pressão, células de carga, inclinómetros, entre outros. A Figura 5.23 apresenta um exemplo de um sensor destinado a medir a abertura de fendas, que permite medir até $\pm 5\text{mm}$.

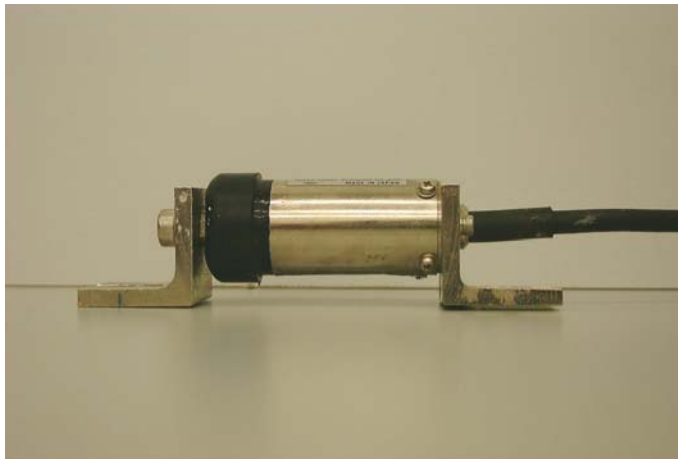


Figura 5.23 — Medição de abertura de fendas com base em extensometria eléctrica.

CAPÍTULO 6

MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

6.1 INTRODUÇÃO

A temperatura, além de constituir uma acção sobre as estruturas, é também um factor de interferência na medição das grandezas que interessam à monitorização estrutural. A temperatura interfere na medição porque altera as características dos instrumentos de medição e porque, conforme foi referido anteriormente, ao afectar o estado de deformação da estrutura, dificulta a interpretação das extensões. A observação da temperatura no comportamento estrutural tem, por isso, dois objectivos principais: (1) compensar desvios dos instrumentos de medição; (2) contribuir para a determinação da parcela da deformação livre. Daí que a medição da temperatura deva ser feita nas proximidades dos instrumentos nos quais se pretende a compensação, e em pontos criteriosamente seleccionados, que permitam definir a distribuição da temperatura no seu interior.

Na observação de estruturas inúmeros factores contribuem para a dificuldade na obtenção e interpretação da temperatura. Desde logo, devido aos elevados gradientes térmicos frequentemente observados, em resultado de diferentes exposições solares. Por exemplo, num dia de sol a temperatura superficial da face exposta ao sol de uma estrutura de betão pode facilmente ser superior em 20°C à de uma outra na vizinhança, mas que esteja à sombra. Contudo, nem sempre é imediata a definição das faces que estão expostas ao sol. Durante a construção, é frequente a utilização de estruturas provisórias, que podem, temporariamente, ensombrar determinada zona da estrutura. Se a temperatura está a ser medida exactamente nessa zona, os resultados da medição surgem afectados.

Outros factores contribuem para dificuldade na medição da temperatura, como por exemplo, a baixa condutibilidade térmica do betão, a elevada condutibilidade térmica do aço, a cor da superfície das peças, entre outros.

Em determinados casos mais complexos pode ser conveniente um estudo prévio destes efeitos na distribuição da temperatura do elemento estrutural. Por exemplo, para caracterizar a distribuição da temperatura na secção transversal dos tirantes da Ponte Internacional do Guadiana e da Ponte do Arade procedeu-se no LNEC a um estudo em modelo à escala natural dos referidos tirantes (Santos, Fernandes e Santos, 1993), tendo-se estudado a influência da exposição solar, do revestimento, do rumo e da velocidade do vento. Para o efeito, além da temperatura ambiente, foi medida a temperatura em doze pontos do interior de cada uma das secções instrumentadas.

Nas estruturas de betão o processo a que se tem recorrido mais frequentemente para minorar o efeito indesejável da temperatura e, em especial, da exposição solar, é a obtenção de medições logo ao princípio da manhã. Mesmo assim a temperatura é uma grandeza cuja medição é incontornável na monitorização estrutural.

Existe actualmente uma grande variedade de instrumentos destinados à medição da temperatura, cada um dos quais apresentando características que os tornam particularmente indicados para determinadas aplicações específicas. De entre estas características salienta-se a gama de medição e a linearidade. Como adiante se verá, a gama de temperaturas com que usualmente se trabalha na monitorização de estruturas está contida num intervalo muito pequeno da gama de medição de qualquer um dos instrumentos de medição correntemente utilizados. Justifica-se, por isso, neste capítulo, uma descrição geral do funcionamento de cada um dos sensores de temperatura mais usados na monitorização das estruturas, indicando-se apenas as principais características técnicas e o respectivo princípio de funcionamento. No final são apresentados alguns resultados de ensaios conduzidos em laboratório, para calibração de sensores na medição da temperatura ambiente, e na medição da temperatura no interior de um prisma de betão.

6.2 TERMOPARES

Quando se mantêm dois pontos de um dado metal a temperaturas distintas, T_1 e T_2 , a vibração dos átomos e o movimento dos electrões são afectados de tal forma que se cria uma diferença de potencial entre os dois pontos do metal. Esta diferença de potencial está relacionada com o facto de os electrões na zona mais quente terem mais energia térmica do que os da zona mais fria e, por conseguinte, aqueles tenderem a deslocar-se para a região mais fria. Este movimento varia consoante as condutibilidades térmicas dos metais. Se se fechar um circuito ligando as extremidades por meio de outro condutor verifica-se que passa uma corrente na malha fechada. Diz-se que se estabeleceu uma força electromotriz (f.e.m.) termoeléctrica no circuito que faz circular a corrente (ver

Figura 6.1 a)). É neste efeito, conhecido como Efeito de Seebeck, que assenta o funcionamento dos termopares (Johnson, 1990).

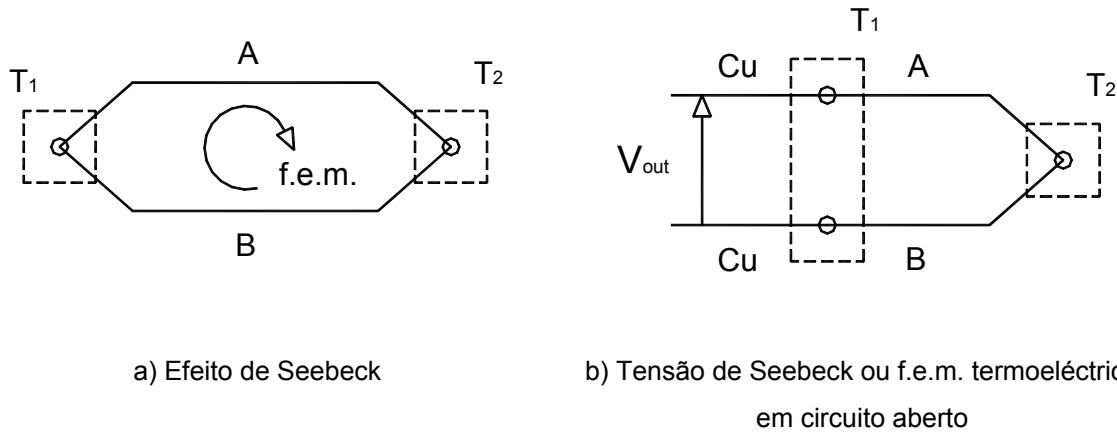


Figura 6.1 — Princípio de funcionamento dos termopares.

Prova-se que a f.e.m. de Seebeck F_s , produzida em volts, para um dado termopar é proporcional à diferença entre as temperaturas das junções e pode ser dada pela expressão:

$$F_s = \alpha(T_2 - T_1), \quad (6.1)$$

sendo α uma constante expressa em $V/^\circ C$ e que depende essencialmente da diferença entre as constantes de condutibilidade térmica dos 2 metais.

A constante α depende, ainda que apenas ligeiramente, da temperatura a que os metais estão sujeitos, pelo que nos casos em que se pretenda maior precisão, este facto deverá ser tido em conta.

Deste modo, se uma das junções for mantida a uma temperatura constante e conhecida, designada *junção fria* ou *junção de referência*, será possível calcular a temperatura da outra junção, designada *junção quente* ou *junção de medição*, através da medição da f.e.m. termoelétrica gerada em circuito aberto (ver Figura 6.1 b)). Se as junções de referência e de medição estiverem à mesma temperatura ($T_2 - T_1 = 0$), ou se os dois condutores do termopar forem constituídos pelo mesmo material ($\alpha=0$) o valor da f.e.m., naturalmente, será zero.

Na prática a junção é apenas uma ligação entre os dois metais que constituem o termopar. Esta ligação pode ser conseguida apenas através do enrolamento dos dois fios ou através de soldadura. A Figura 6.2 apresenta um exemplo de um termopar do tipo K em que a junção de medição foi torcida e depois soldada a prata. No mercado podem encontrar-se termopares com condutores que apresentam diâmetros que vão desde os 0,5mm até aos 12,7mm.

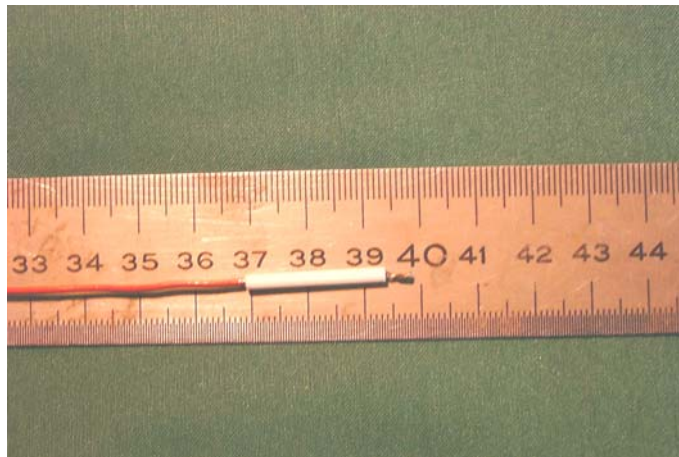
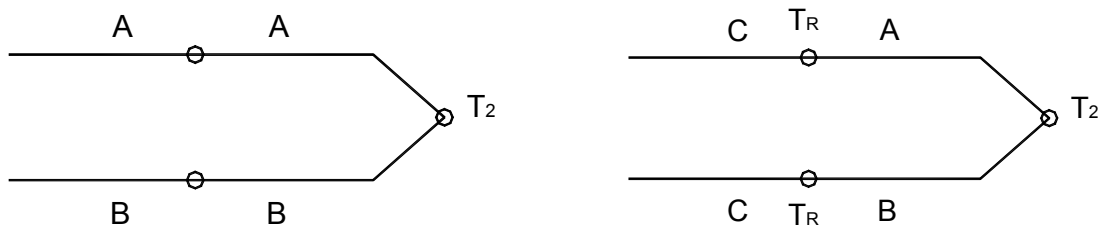


Figura 6.2 — Exemplo de um termopar do tipo K.

Todas as ligações entre metais diferentes realizadas na malha constituirão uma junção, contribuindo por isso mesmo para a f.e.m. gerada, tornando mais complexo o processo de medição (Restivo, 1994). A utilização de extensões para conduzir o sinal ao equipamento de medida está por isso condicionada. Ou se usam fios dos mesmos materiais que constituem o termopar, ainda que com diferentes diâmetros, conforme se representa na Figura 6.3 a) ou, caso se opte por fios de diferente material, é necessário conhecer a temperatura das respectivas junções (T_R na Figura 6.3 b)) para proceder à posterior correcção dos valores lidos.



a) Com os mesmos materiais dos termopares

b) Com material distinto

Figura 6.3 — Uso de extensões em termopares.

No Quadro 6.1 apresentam-se algumas das configurações padrão de termopares. Cada configuração, designada por uma letra, é constituída por dois metais distintos, apresentando características particulares como a gama de medição, a linearidade, a sensibilidade, a resistência às condições ambientais, entre outras. Apresenta-se também a f.e.m. gerada por cada um dos termopares que como se pode observar é de muito baixo nível, não ultrapassando, em geral, algumas dezenas de mV para as temperaturas máximas.

Quadro 6.1 — Caracterização sumária de algumas configurações padrão de termopares.

Tipo	Materiais A—B (*)	Gama de medida [°C]	F_{ε} (f.e.m.) [mV]
C	75% tungsténio + 25% rénio 74% tungsténio + 26% rénio	0 — +2320	0 — +37,066
E	cromel [®] constantan	-164 — +885	-8,824 — +68,783
J	ferro constantan	0 — +749	0 — +42,283
K	cromel [®] — alumel [®]	-164 — +1250	-5,973 — +50,633
S	90% platina + 10% ródio 100% platina	0 — 1450	0 — +14,973
T	cobre constantan	-164 — +350	-5,602 — +17,816

(*) — cromel[®] e alumel[®] são marcas registadas de ligas.

Para as configurações mais correntes de termopares faz-se na Figura 6.4 a) a representação gráfica da relação entre a f.e.m. termoelétrica, e a temperatura da junção de medição, quando a temperatura da junção de referência é de 0°C. Para cada uma das configurações de termopares a variação do coeficiente de Seebeck, com a temperatura da junção de medição, representada na Figura 6.4 b), dá uma ideia da sensibilidade do termopar. Da sua análise pode-se afirmar que, para toda a gama de medição de cada uma destas configurações, os termopares não apresentam um comportamento linear. Contudo, existem processos relativamente simples de obter medições com melhor acuidade, com recurso a tabelas de calibração ou de expressões que aproximam as respectivas curvas de sensibilidade. Nas aplicações na área da engenharia civil trabalha-se com gamas de temperatura definidas em intervalos muito mais pequenos, em geral compreendido entre -20°C e +100°C. Para este intervalo de valores pode dizer-se que os termopares apresentam um comportamento linear.

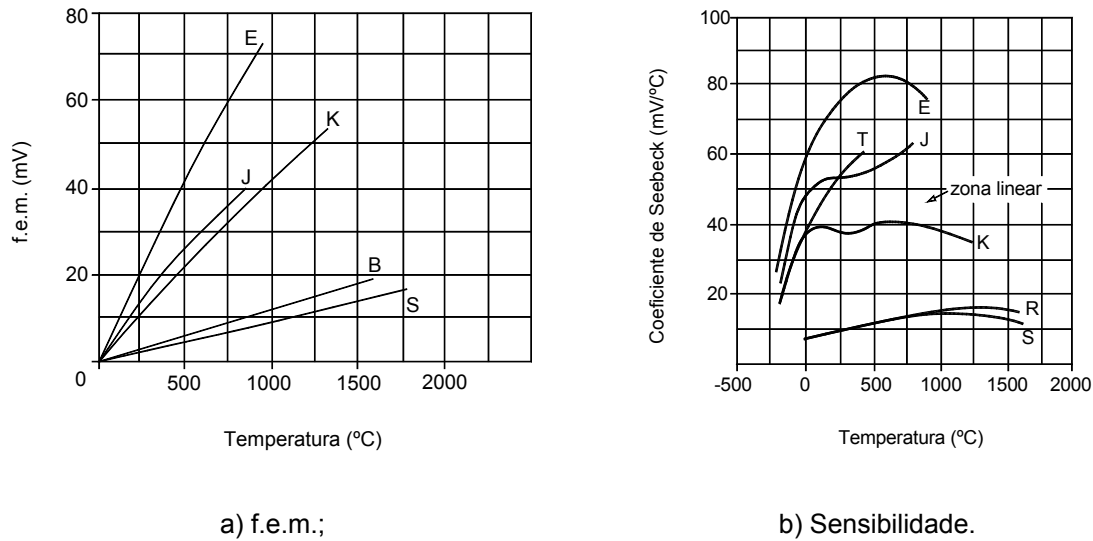





Figura 6.4 — Curvas características de f.e.m. e de sensibilidade de alguns termopares.

A calibração dos termopares é feita para a junção de referência a 0°C. Nas aplicações práticas existem processos para evitar a necessidade de se ter um ponto no sistema de medição a esta temperatura. O mais simples e o mais correntemente utilizado, passa pela utilização de circuitos de compensação da referência. Estes circuitos de compensação podem, por exemplo, basear-se na construção de uma ponte de Wheatstone em que num dos braços da ponte é instalado um sensor de temperatura resistivo. Alternativamente, alguns equipamentos fazem a correcção de referência por programação através da medição da temperatura da junção de referência (com recurso a um LM35, por exemplo), e de rotinas de programação que fazem a correcção ao sinal da f.e.m. gerada pelo termopar.

A gama de tensões geradas por um termopar é muito baixa, em geral inferior a 80mV (ver Figura 6.4 a)) e a sua sensibilidade varia entre 5µV/°C e 50µV/°C. Por exemplo, o termopar do tipo K, na gama de valores em que é aproximadamente linear, apresenta uma sensibilidade de 0,04mV/°C. Acontece que, a simples presença nas proximidades de uma máquina eléctrica pode gerar um ruído eléctrico com um sinal centenas de vezes superior ao valor gerado pelo termopar. Por outro lado, constituindo o termopar uma antena, é capaz de captar o ruído da radiação electromagnética nas bandas da rádio, TV e de telemóveis. Daí a conveniência e a necessidade de blindar os fios do termopar desde a junção de medição até ao equipamento de medição, melhorando-lhe as características de protecção electromagnética. Esta blindagem pode ser feita apenas aos fios condutores, com a junção de medição desprotegida, ou incluir a própria junção de medição. Neste último caso, se a junção estiver em contacto com a blindagem é necessário que esta seja referenciada, podendo por isso ficar sujeita

a espirais de referenciação. No Quadro 6.2 resumem-se as principais características dos sistemas de protecção às junções de medição em termopares, (Restivo, 1994).

Quadro 6.2 — Protecção às junções de medição em termopares.

Esquema	Principais características
	Junção de medição blindada não referenciada — atribui as melhores características de protecção electromagnética; como a junção está isolada, o tempo de resposta é mais lento.
	Junção de medição blindada e referenciada — tempo de resposta mais rápido; como a junção está em contacto com a blindagem metálica de protecção, está sujeita a <i>loops</i> de referenciação e a ruído electromagnético.
	Junção de medição desprotegida — apresenta o tempo de resposta mais curto; como a junção está desprotegida não é recomendado para meios ambientes agressivos.

Uma solução que tem vindo a ser adoptada para obviar as consequências decorrentes do sinal gerado pelos termopares ser muito pequeno é a utilização de amplificadores e de conversores, incluindo alguns deles compensação electrónica de junção de referência. Estes amplificadores podem ser instalados nas proximidades da junção de medição, podendo-se então colocar o equipamento de aquisição de sinal a maior distância, reduzindo consideravelmente os problemas de perdas ao longo dos cabos. A Figura 6.5 apresenta um destes modelos de amplificadores da Wieland, Inc., projectado para alguns tipos de termopares (J, K, S e T), com saída em tensão de 0V a 10V, ou em corrente de 0mA a 20mA, para a gama de temperaturas entre 0°C e 70°C.

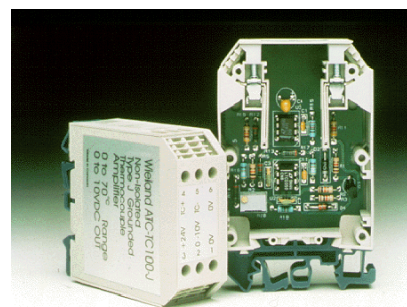
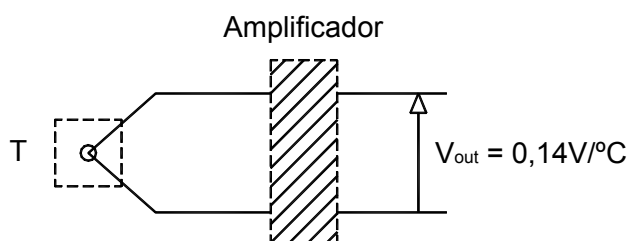


Figura 6.5 — Amplificador de sinal para termopares.

6.3 DETECTORES DE TEMPERATURA RESISTIVOS

Um detector de temperatura resistivo (RTD — sigla do inglês de *resistance temperature detector*) é um sensor de temperatura baseado no princípio do aumento da resistência do metal com a temperatura. O metal mais usado neste tipo de sensores é a platina, sendo por vezes designado por PRT (sigla do inglês de *platinum resistance thermometer*), embora outros metais possam ser utilizados como o cobre, o níquel e o balco. Mais recentemente têm surgido ligas de metais que apresentam características muito idênticas à da platina, constituindo para certas gamas de medição uma solução economicamente mais atraente.

Os RTD's assentam no princípio de que um metal é uma montagem de átomos no estado sólido, em que os átomos individuais estão numa posição de equilíbrio. Apresentam como principal característica, cada átomo poder ceder um electrão, chamado electrão de valência. À temperatura do zero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$) este electrão pode mover-se livremente através do material, isto é, torna-se um electrão de condução.

Os electrões de condução tendem a colidir com os átomos que vibram quando no material existe uma certa energia térmica. Este facto inibe, em certa medida, o livre movimento dos electrões, absorvendo parte da sua energia, apresentando, por isso, uma certa resistência ao fluxo de corrente eléctrica. A um aumento de temperatura, corresponde um aumento da amplitude e da frequência de vibração dos átomos e, por consequência, um aumento das colisões com os electrões, reduzindo a sua velocidade média. Daí que, a resistência de um metal aumente com o aumento da temperatura.

A resistência R de um elemento condutor, a temperatura constante, é dada pela expressão:

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (6.2)$$

em que,

l — é o comprimento do elemento condutor;

A — é a área da secção transversal;

ρ — é a resistividade.

De acordo com esta expressão a variação de resistência é consequência da variação da resistividade e da alteração das dimensões do elemento condutor provocadas pela variação da temperatura.

A relação entre a resistência e a temperatura de um dado condutor é dada pela expressão geral:

$$R_T = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n), \quad (6.3)$$

em que,

R_T — é a resistência do condutor à temperatura T ;

R_0 — é a resistência do condutor à temperatura de 0°C ;

T — é a temperatura;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ — são constantes típicas do condutor.

No caso do elemento sensor ser a platina, o cobre ou o níquel, numa gama de medida bastante alargada, esta expressão pode ser simplificada, sendo em geral suficiente considerar um variação linear entre a resistência e a temperatura dada por:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T), \quad (6.4)$$

sendo α o chamado coeficiente de temperatura da resistência. Este factor é muito sensível à presença de impurezas ou à deformação mecânica. Para uma gama de temperatura desde o gelo fundente até à temperatura de ebulição, o valor médio de α pode ser calculado a partir da expressão:

$$\alpha \cong \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}, \quad (6.5)$$

No Quadro 6.3 estão especificadas algumas características dos condutores mais utilizados nos RTD's (Pallas-Areny, 1991 e Fink e Christiansen, 1982). O níquel apresenta uma elevada sensibilidade mas a gama de medição onde este é linear é mais pequena do que a platina. A resistividade é um parâmetro muito importante. Este deve ser elevado para que o sensor tenha um elevado valor óhmico, permitindo a utilização de fios de ligação ao equipamento de aquisição mais compridos. A platina apresenta o mais elevado valor de resistividade. Sensores de elevada resistência apresentam também uma massa reduzida, permitindo tempos de resposta mais curtos.

Quadro 6.3 — Especificações de alguns RTD's.

Parâmetro	Unidades	Platina	Cobre	Níquel
ρ (a 20°C)	$\mu\Omega \times \text{cm}$	10,6	1,673	6,844
α ($\times 10^{-3}$)	$\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$	3,85	4,30	6,81
R_0 (resistência a 0°C)	Ω	50, 100, 200, 500, 1000,	10 (20°C)	50, 100, 120
Gama de medição	$^\circ\text{C}$	-200 a +850	-200 a +260	-80 a +320

Como se pode verificar, num RTD a percentagem de variação da resistência com a temperatura é muito pequena. De acordo com a expressão (6.4), o aumento de temperatura no sensor de T_1 para T_2 induz uma variação de resistência dada por:

$$R_{T_2} - R_{T_1} = R_0 [\alpha(T_2 - T_1)], \quad (6.6)$$

onde R_{T_1} e R_{T_2} são o valor da resistência à temperatura T_1 e T_2 , respectivamente.

Se, por exemplo, se verificar um aumento de temperatura de 10°C, um PRT de 100 Ω acusará uma variação de resistência dada por:

$$R_{T_2} - R_{T_1} = 100[0,00385 \times 10] = 3,85\Omega. \quad (6.7)$$

Este valor é muito pequeno quando comparado com o valor da resistência dos fios de ligação do sensor ao sistema de aquisição, podendo mesmo ser da mesma ordem de grandeza. Acresce ainda que o efeito da variação da temperatura na resistência dos fios, pode introduzir alteração no sinal, sem correspondência directa com a variação de temperatura no elemento sensor. Daí que, para a aquisição de sinal proveniente dos RTD's se recorra ao circuito da ponte de Wheatstone, apresentado em pormenor no capítulo anterior.

Conforme foi oportunamente detalhado, as configurações recomendadas são as de 3 fios ou de 4 fios (ver Figura 6.6) por forma a haver compensação nos dois braços da ponte quer da resistência dos fios condutores quer dos efeitos que a variação de temperatura ambiente neles provoca.

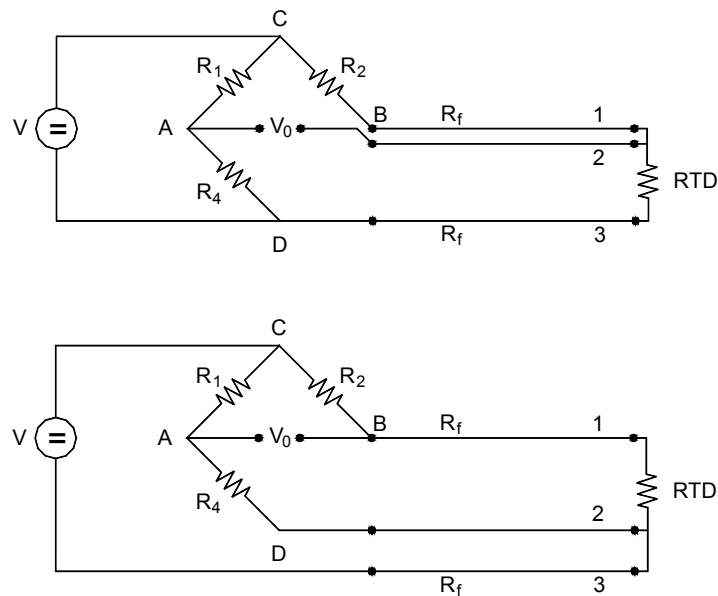


Figura 6.6 — Esquemas de ligação em ponte de Wheatstone de um RTD com três fios.

O elemento sensor mais utilizado é a platina, com a resistência de 100Ω a 0°C , recebendo por isso a designação corrente de PT100. Construído inicialmente com base num enrolamento de um fio muito fino tem-se optado cada vez mais frequentemente pela deposição de um filme sobre um substrato cerâmico. Exteriormente a resistência é revestida por uma camada protectora e devidamente encapsulada.

A Figura 6.7 apresenta um exemplo de um sensor PT100 de película fina que é construído pela deposição em vazio de platina sobre um substrato cerâmico com o apoio de um laser, de modo a formar um elemento resistivo muito estável. Aos dois pernos do sensor podem ser ligados 2, 3 ou 4 fios, bastando para isso fazer a correspondente ligação de fios adicionais. De acordo com a BS1904, este sensor pertence à classe B, com 100Ω a 0°C e apresenta uma gama de -50°C a $+500^\circ\text{C}$. As reduzidas dimensões ($2\text{mm}\times 10\text{mm}\times 1,4\text{mm}$), a rápida resposta térmica e a sua construção simples são algumas das características que fazem deste sensor uma boa solução para uma vasta gama de aplicações.



Figura 6.7 — Exemplo de um sensor de temperatura PT100.

O encapsulamento dos PT100 varia de acordo com as aplicações que se pretende fazer. A Figura 6.8 apresenta um exemplar de um PT100 cujo invólucro é um tubo de aço inox, com 6mm de diâmetro exterior e 100mm de comprimento. No caso das aplicações na área das estruturas de engenharia civil é fundamental que esteja garantida a estanquicidade e a protecção mecânica do elemento sensor. A adopção de um encapsulamento em aço inox, além de preencher este requisito de resistência, permite encurtar o tempo de resposta do sensor dada a sua elevada condutibilidade térmica.



Figura 6.8 — Sensor de temperatura PT100 de embeber no betão.

Existem alternativas aos sensores resistivos de platina a custos mais moderados. A Figura 6.9 ilustra um exemplo de uma destas resistências, designada PCR100. Apresenta à temperatura de 0°C uma resistência de 100Ω e um comportamento aproximadamente linear com sensibilidade média de 0,003850Ω/Ω/°C para um campo de medida entre -40°C e +150°C. Esta resistência tem por base um

condutor constituído por uma liga de níquel, cobre, magnésio e ferro, depositado sobre uma matriz epóxida e encapsulada por uma resina epóxida resistente à humidade e aos dissolventes. As principais características técnicas desta resistência são apresentadas no Quadro 6.4.



Figura 6.9 — Exemplo do sensor de temperatura PCR100.

Quadro 6.4 — Principais características técnicas da PCR100.

Parâmetro	Unidades	PCR100
ρ (a 20°C)	$\mu\Omega \times \text{cm}$	
α ($\times 10^{-3}$)	$\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$	3,85
R_0 (resistência a 0°C)	Ω	100
Gama de medição	$^\circ\text{C}$	-40 a +150

6.4 TERMISTORES

Um termistor é uma resistência constituída por materiais semicondutores, muito sensível à variação de temperatura. Podem ser do tipo PTC (sigla do inglês de *positive temperature coefficient*), ou NTC (sigla do inglês de *negative temperature coefficient*) (Johnson, 1990). Os primeiros são geralmente designados por termistores de comutação, muito frequentemente empregues para sensores reguladores de temperaturas em fornos. Os segundos são largamente utilizados para medições de temperatura, apresentando uma grande sensibilidade, embora exibindo uma forte não linearidade.

Ao contrário do que acontece com os metais, os electrões nos materiais semicondutores estão ligados a cada molécula com força suficiente para que, à temperatura 0 K, não haja electrões de condução para transportar corrente através do material. Quando a temperatura do material é aumentada as moléculas começam a vibrar. No caso dos semicondutores estas vibrações fornecem energia adicional aos electrões de valência. Quando esta energia ultrapassa um certo valor, estes electrões libertam-se das moléculas tornando-se electrões de condução. À medida que a temperatura vai aumentando, aumenta mais a vibração das moléculas e por isso mais electrões de valência vão sendo libertados. Daí que nos semicondutores a resistência diminua quando é aumentada a

temperatura do material. Os semicondutores, ao contrário dos metais, apresentam então muito elevada resistência quando sujeitos a temperaturas baixas, e resistência muito baixa para temperaturas elevadas. Também ao contrário dos metais, nos semicondutores a variação da resistência com a temperatura é fortemente não linear. Na Figura 6.10 apresenta-se um exemplo dessa variação (Johnson, 1990).

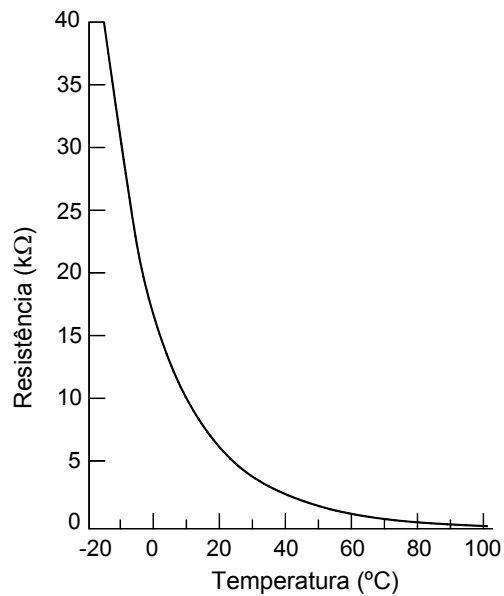


Figura 6.10 — Variação da resistência com a temperatura de um termistor.

Com base nos semicondutores têm sido desenvolvidos circuitos integrados que linearizam a sua resposta com a temperatura, obtendo-se sensores de temperatura de elevada qualidade e muito económicos. A Figura 6.11 apresenta um exemplo de um termistor, produzido pela Quality Thermistor, Inc., de pequenas dimensões, encapsulado numa resina epóxida, para utilização numa gama de temperatura entre -55°C e +150°C.

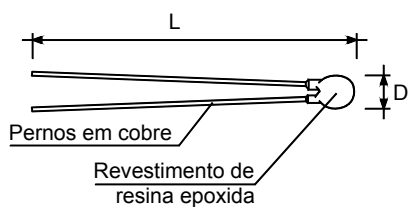
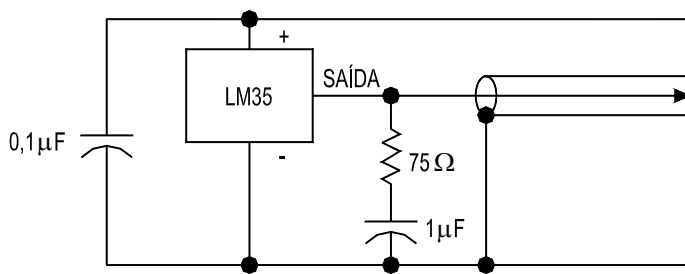
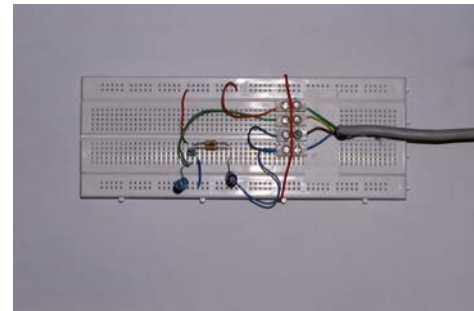


Figura 6.11 — Esquema e encapsulamento de um termistor do tipo NTC.

Um outro exemplo deste tipo de sensores é a série LM35 da National Semiconductor Corporation. Apresenta uma boa acuidade, de $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ à temperatura ambiente, e de $0,75^{\circ}\text{C}$ em toda a gama de temperatura de -55°C até $+150^{\circ}\text{C}$. É alimentado com uma corrente de $60\mu\text{A}$, apresentando um nível de auto-aquecimento muito baixo, inferior a $0,1^{\circ}\text{C}$ em ambiente fechado. Para melhorar a tolerância da capacitância uma montagem recomendada com este tipo de sensor, está representada na Figura 6.12 e inclui a utilização de um conjunto de componentes electrónicos, como uma resistência e dois condensadores. A Figura 6.13 apresenta a construção de um sensor deste tipo, antes e após o encapsulamento num tubo de aço.



a) Esquema das ligações



b) Protótipo

Figura 6.12 — Protótipo de um sensor de temperatura realizado com base num LM35.

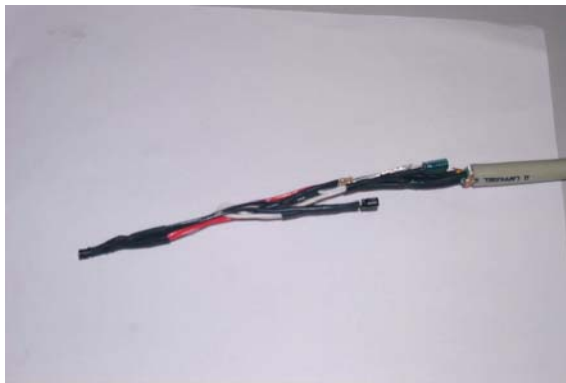


Figura 6.13 — Sensor de temperatura LM35 antes e após o encapsulamento.

6.5 MEDIÇÕES DE TEMPERATURA

6.5.1 Medição da temperatura ambiente

Com o objectivo de testar e comparar o comportamento de diversos sensores de temperatura, foram realizadas medições da temperatura com um mesmo sistema de aquisição (DataTaker DT505), em diversas condições de ensaio. Foram utilizados os seguintes sensores:

- 1 termopar tipo K (Figura 6.2);
- 1 termopar tipo T;
- 1 PT100 com ligação a 3 fios, da Gage Technique (Figura 6.8);
- 1 protótipo de um sensor construído com base no LM35 (Figura 6.12 b)).

Num primeiro ensaio procurou medir-se a temperatura ambiente no interior de uma sala. Os sensores foram instalados no interior de uma caixa de poliestireno expandido com o objectivo de minimizar os efeitos locais de variações de temperatura, associadas essencialmente à circulação de pessoas na proximidade dos sensores e também a correntes de ar. Foram realizadas 250 leituras com uma periodicidade de 10 minutos. Os valores medidos estão apresentados na Figura 6.14.

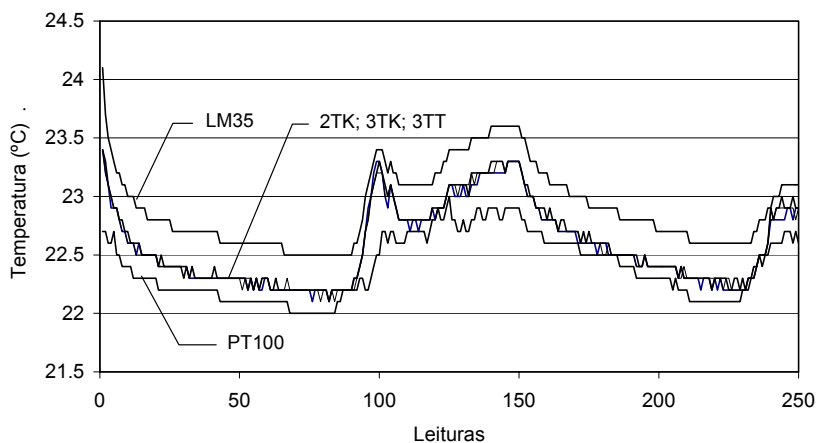


Figura 6.14 — Temperatura ambiente lida nos diversos sensores.

No canal 2 do equipamento de aquisição foi instalado um termopar do tipo K (2TK na figura). O termopar tipo T, instalado no canal 3, foi lido com dois comandos distintos: como termopar tipo T (3TT na figura) e como se fosse do tipo K (3TK na figura). Verificou-se que os valores lidos, em qualquer um dos termopares, são muito semelhantes, pelo que se pode concluir que, para esta gama de

temperaturas, é indiferente utilizar um termopar do tipo T ou do tipo K. Além disso, a tabela de conversão da f.e.m. gerada para qualquer um deles, para esta gama de temperatura, é muito semelhante, o que está de acordo o gráfico da Figura 6.4 b). A máxima diferença entre valores medidos pelos termopares é de $0,1^{\circ}\text{C}$, sendo o valor médio das diferenças de $0,0^{\circ}\text{C}$.

O LM35 apresentou sempre valores superiores ao do PT100. As diferenças encontradas ao longo do ensaio varia entre $+0,3^{\circ}\text{C}$ e $+0,9^{\circ}\text{C}$. Esta diferença é frequentemente de $+0,5^{\circ}\text{C}$, o que aliás coincide com o valor médio das diferenças. Este erro, sendo um erro sistemático, é passível de ser eliminado através de calibração. Por outro lado, o LM35 apresenta, em geral, valores superiores ao dos termopares. As diferenças encontradas variam entre $0,0^{\circ}\text{C}$ e $+0,4^{\circ}\text{C}$. O valor médio da diferença é de $+0,3^{\circ}\text{C}$.

Entretanto outros ensaios foram realizados para comparar os valores lidos em vários sensores, para diversas condições de temperatura. Para o efeito recorreu-se a um estufa (ver Figura 6.15) onde é possível controlar a temperatura interior. Refira-se a título de curiosidade que o sensor de temperatura da própria estufa, é um LM35.

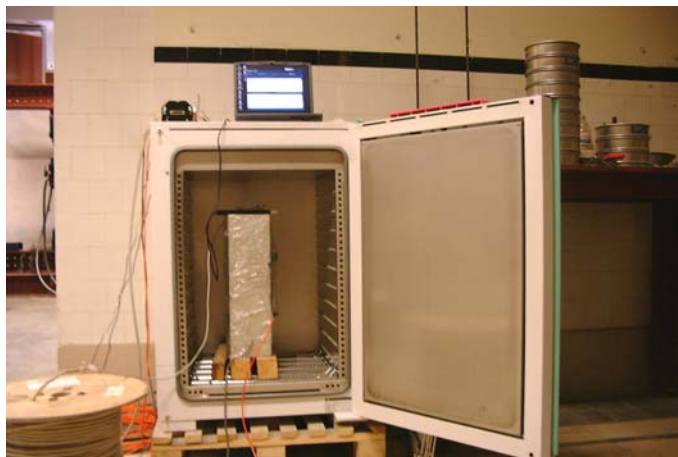


Figura 6.15 — Sensores de temperatura no interior da estufa.

Procedeu-se então a novo ensaio, mas agora apenas com os sensores LM35 e PT100. Os sensores foram instalados no interior da estufa, que numa primeira fase foi programada para 30°C . Foram feitas cerca de 200 leituras, com uma periodicidade de 10 minutos. Os resultados obtidos estão representados na Figura 6.16. Mais uma vez o LM35 apresentou valores sempre superiores ao do PT100. As diferenças encontradas variam entre $+0,3$ e $+0,4^{\circ}\text{C}$. O valor médio das diferenças é de $+0,35^{\circ}\text{C}$.

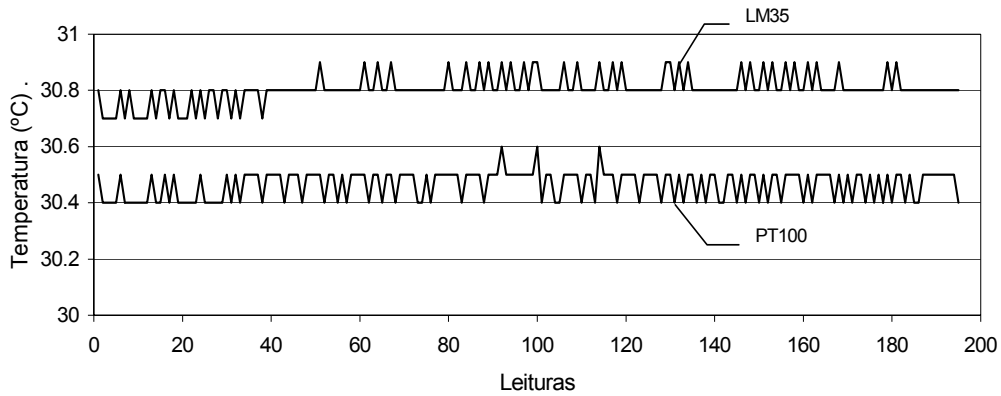


Figura 6.16 — Valores lidos no LM35 e no PT100 na estufa a 30°C.

Numa segunda fase elevou-se a temperatura da estufa para 40°C e fizeram-se mais cerca de 200 registos que estão expressos na Figura 6.17. O LM35 apresentou sempre valores superiores ao do PT100. As diferenças encontradas variaram entre 0,3 e 0,4°C. O valor médio das diferenças foi de +0,34°C.

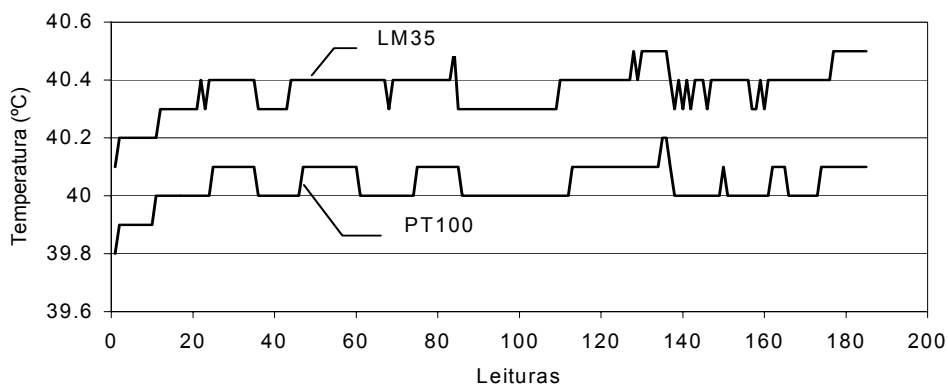


Figura 6.17 — Valores lidos no LM35 e no PT100 na estufa a 40°C.

Um outro ensaio foi conduzido, tendo sido feitas 954 aquisições com um intervalo entre leituras constante de 10 minutos. Neste novo ensaio foi incluído um novo PT100 mas ligado com 4 fios, fabricado pela Gage Technique, com encapsulamento em tudo semelhante ao do PT100 de três fios ensaiado anteriormente.

O ensaio foi conduzido com a seguinte sequência de operações:

- Estufa desligada e de porta aberta (temperatura ambiente) durante cerca de 2 horas;

- ❑ Estufa regulada para 30°C;
- ❑ Estufa desligada;
- ❑ Estufa regulada para 30°C;
- ❑ Estufa regulada para 40°C;
- ❑ Estufa regulada para 60°C;
- ❑ Estufa desligada.

A Figura 6.18 apresenta os resultados encontrados ao longo de todo o ensaio. Observa-se que:

- a) Os sensores PT100 a 3 fios e a 4 fios, no gráfico designados como PT100's, apresentam, ao longo de todo o ensaio, sensivelmente os mesmos valores de temperatura, com diferenças que em média são de 0,1°C e no máximo de 1°C – estas diferenças mais elevadas são pontuais e podem resultar, por exemplo, de uma abertura indevida da porta da estufa.
- b) Quando a temperatura no interior da estufa é uniforme - zona dos patamares no gráfico - o termopar tipo K apresenta os valores mais elevados e os PT100 apresentam os valores mais baixos; este erro é sistemático ao longo de todos os patamares. O Quadro 6.5 apresenta um excerto destes resultados, para as temperaturas programadas de 30°C, 40°C e 60°C no interior da estufa, e para a temperatura ambiente, para os diferentes sensores.

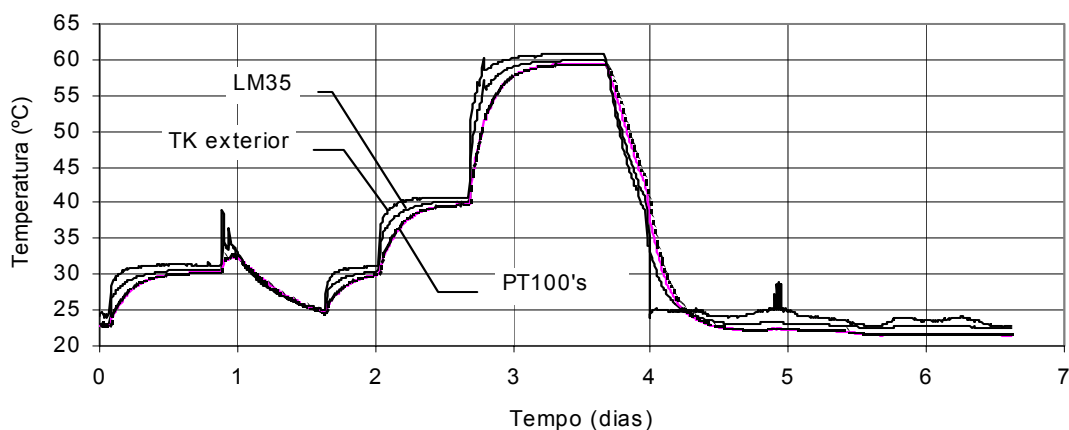


Figura 6.18 — Temperaturas lidas em diversos tipos de sensores.

Quadro 6.5 — Excerto de valores de temperatura lidos nos sensores.

Dia	Hora	LM35DZ	PT385(4fios)	PT385(3 fios)	Termopar TK
(...)					
19/09/00	11:10:00	30.6	30.3	30.3	31.3
19/09/00	11:20:00	30.6	30.3	30.3	31.3
19/09/00	11:30:00	30.6	30.3	30.3	31.3
19/09/00	11:40:00	30.6	30.3	30.3	31.3
19/09/00	11:50:00	30.6	30.3	30.3	31.3
(...)					
21/09/00	08:30:00	40.2	39.8	39.8	40.7
21/09/00	08:40:00	40.2	39.8	39.8	40.7
21/09/00	08:50:00	40.2	39.8	39.7	40.6
21/09/00	09:00:00	40.1	39.8	39.8	40.6
21/09/00	09:10:00	40.1	39.8	39.8	40.7
(...)					
22/09/00	07:20:00	59.9	59.5	59.4	60.8
22/09/00	07:30:00	59.9	59.5	59.4	60.8
22/09/00	07:40:00	59.9	59.5	59.4	60.9
22/09/00	07:50:00	59.9	59.5	59.4	60.8
22/09/00	08:00:00	59.9	59.5	59.4	60.8
(...)					
24/09/00	11:00:00	22.5	21.6	21.6	23.3
24/09/00	11:10:00	22.5	21.6	21.6	23.4
24/09/00	11:20:00	22.5	21.6	21.6	23.4
24/09/00	11:30:00	22.6	21.6	21.7	23.4
24/09/00	11:40:00	22.6	21.6	21.7	23.4
(...)					

- c) O termopar e o LM35 respondem mais rapidamente do que os PT100 às variações de temperatura impostas pela estufa. Isto deve-se ao facto de os sensores PT100 estarem encapsulados, preparados para serem embebidos no betão, enquanto que os restantes sensores não. Estando estes últimos sensores mais expostos, apresentam naturalmente uma menor inércia térmica.
- d) O termopar apresenta por vezes resultados de difícil interpretação, de que é exemplo a perturbação verificada no final do 4º dia de ensaio em que se verificaram diferenças de temperatura superiores a 6°C. Estas diferenças podem ter sido causadas por interferências electromagnéticas.

Apresenta-se na Figura 6.19 um excerto da Figura 6.18, relativo ao período de tempo compreendido entre as 5:40 horas do dia 23 de Setembro de 2000, que coincidiu com um sábado, e as 8:30 do dia 25 (2ª feira), aquando do final do ensaio. A temperatura a que os sensores ficaram sujeitos foi a temperatura ambiente dado que nesta altura já tinham sido retirados da estufa.

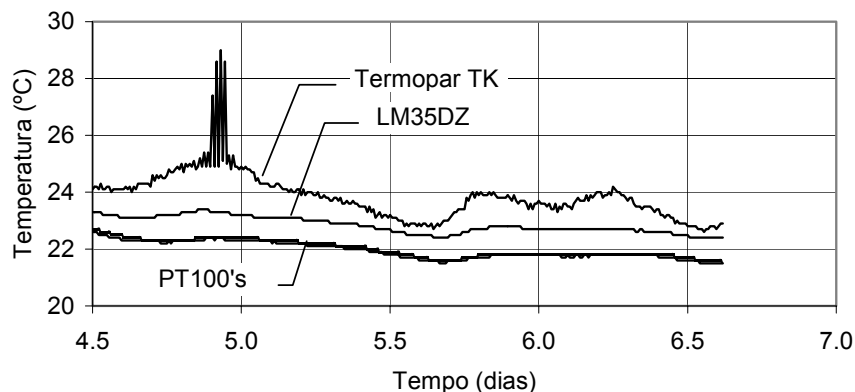


Figura 6.19 — Temperaturas lidas para os diversos tipos de sensores no período em referência.

De um modo geral é possível classificar de bom o comportamento de qualquer um dos sensores. Os protótipos montados na placa de ensaio, com base no LM35, apresentam valores ligeiramente superiores aos PT100 devidamente encapsulados, e prontos a instalar. Os termopares podem apresentar algumas deficiências na leitura, provavelmente como resultado da ausência de malha que proteja os fios de ruídos de origem electromagnética.

A obtenção de diferenças sistemáticas entre valores de temperatura, quando são usados sensores de tipo diferente, permite concluir da necessidade de calibração destes instrumentos de medição. Esta calibração reveste-se de especial importância quando se pretende comparar resultados de medição provenientes de cada um deles.

6.5.2 Medição da temperatura no interior de um prisma de betão

Com o objectivo de se observar a evolução da temperatura no interior do betão, foi realizado um ensaio com um prisma de betão de dimensões de 15cm×15cm×55cm, no interior do qual foi instalado um PT100 de 4 fios. O PT100 ficou por isso a 7,5cm de distância de cada uma das faces. Alguns dias após a betonagem o prisma foi instalado no interior da estufa, e foi submetido a diversas temperaturas: temperatura ambiente (estufa desligada), 20°C, 40°C, e novamente 20°C. Foram realizadas leituras, com intervalos de 10 minutos, no sensor embebido no interior do betão, e num outro sensor de características idênticas mas colocado junto à face exterior do prisma. As cerca de 1300 leituras realizadas estão representadas na Figura 6.20.

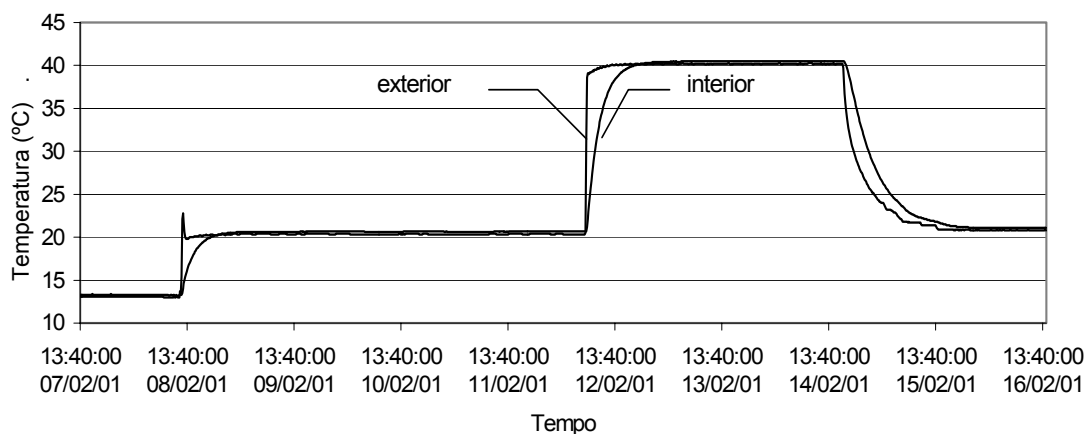


Figura 6.20 — Temperatura exterior e interior a um prisma de betão.

Partindo de uma situação em que o prisma estava a uma temperatura uniforme de 13°C, fez-se variar a temperatura exterior de 13°C para 20°C. O tempo necessário para que o prisma de betão voltasse a exibir uma temperatura uniforme, agora de 20°C, foi de, aproximadamente, 6 horas. Quando a temperatura da estufa aumentou de 20°C para 40°C a temperatura no interior do prisma só atingiu a temperatura da face após 10 horas. O arrefecimento de 40°C para 20°C foi sensivelmente mais demorado, devido ao facto de a estufa ser mais lenta a diminuir a temperatura do seu interior do que a aumentá-la. Daí que, o diferencial entre a temperatura interior do prisma e a temperatura exterior não atinjam os diferenciais verificados durante as fases de aquecimento.

CAPÍTULO 7

MEDIÇÃO DA PRESSÃO

7.1 INTRODUÇÃO

Na observação do comportamento das estruturas enterradas, em que a interacção do maciço envolvente com a estrutura constitui um aspecto essencial, uma questão que se coloca frequentemente é a medição do valor da pressão total instalada na interface solo/estrutura ou rocha/estrutura. Com efeito, no caso de estruturas enterradas, a distribuição da pressão transmitida à estrutura pelo solo é complexa e depende, essencialmente, da rigidez relativa da estrutura face ao solo envolvente e, nos casos em que o solo envolvente resulta de aterros, da rigidez relativa do solo envolvente face ao solo de fundação (Sang, 2000).

O instrumento especialmente dedicado à medição das pressões no interior de um maciço, ou na interface de um maciço com uma estrutura, é designado por sensor ou célula de pressão. Existem no mercado diversos modelos de células de pressão, consoante o campo de aplicação, nomeadamente, para a determinação da pressão no interior do solo (solo/solo) ou da rocha (rocha/rocha), e para a determinação da pressão do maciço sobre a estrutura (solo/estrutura ou rocha/estrutura). No caso da estrutura de suporte ou de contenção ser de betão, as células de pressão podem ser encastrados na própria estrutura durante a fase de betonagem. Existem também modelos para aplicação à face da estrutura que vai estar em contacto com o maciço, indicados, por exemplo, para utilizar em estruturas de betão após a betonagem ou em estruturas constituídas por outros materiais, como o aço ou a madeira.

Uma característica importante a ter em conta na selecção de uma célula de pressão é a gama de pressões se pretende medir. Neste capítulo é apresentado o princípio de funcionamento das células de pressão de utilização mais corrente, aqui designadas por células de pressão convencionais, sendo indicadas algumas das suas características.

O campo de aplicação das células de pressão é vasto e inclui o estudo de estruturas de contenção, estruturas enterradas, barragens e túneis. O custo elevado deste tipo de sensores tem limitado a sua aplicação a estruturas de média e grande dimensão. Contudo, é também nas estruturas enterradas de dimensões mais reduzidas, que se tem verificado um funcionamento deficiente, de que são exemplo as Passagens Ecológicas, as Passagens Hidráulicas e as Passagens Agrícolas. Especialmente quando sobre elas são realizados aterros de altura mais elevada. Este facto é revelador de uma deficiente quantificação das acções sobre este tipo de estruturas, nomeadamente no que diz respeito ao valor da pressão transmitida pelo maciço. Daí que, no final deste capítulo, sejam indicadas algumas alternativas aos actuais produtos comerciais, com vista à obtenção de sensores mais económicos e que, por essa via, permitam uma maior difusão na sua aplicação.

7.2 CÉLULAS DE PRESSÃO CONVENCIONAIS

O princípio de funcionamento das células de pressão, correntemente utilizadas nas estruturas da engenharia civil, também designadas por células de pressão convencionais, assenta essencialmente na medição da deformação por flexão de uma membrana, por hipótese circular, em aço, soldada em todo o seu perímetro a uma estrutura de suporte também em aço, de rigidez comparativamente mais elevada. A espessura da membrana e o seu diâmetro são determinados pelo valor da pressão a ser medido. As dimensões da estrutura de suporte são determinadas de modo a que seja garantido o encastramento da membrana sem que haja deformação apreciável, caso contrário, a deformação da estrutura de suporte influenciaria a medição da deformação da própria membrana. Esta deformação pode ser medida com recurso a transdutores de deslocamento ou a sensores de pressão. Em qualquer dos casos pode recorrer-se à utilização de extensómetros de corda vibrante, de resistência eléctrica, ou mais recentemente a sensores de fibra óptica.

A Figura 7.1 representa uma célula de pressão de encastrar no betão, em que o centro da face interior da membrana sensora está directamente ligado a um transdutor de deslocamento (Tyler, 1976). Neste caso os deslocamentos da membrana sensora são medidos por um extensómetro de corda vibrante, cujo funcionamento é descrito no Capítulo 5.

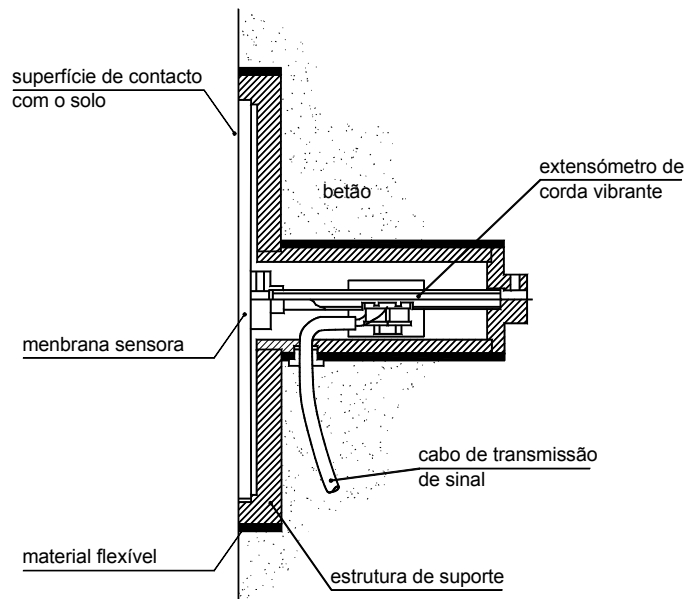


Figura 7.1 — Corte transversal de uma célula de pressão de encastrar no betão.

Dentro de uma certa gama de medição, estabelece-se um relação linear entre deslocamento do ponto central da membrana sensora e a pressão a que esta está sujeita. O deslocamento y do centro do disco encastrado no seu contorno quando sujeito a uma carga uniformemente distribuída é dado pela teoria da elasticidade (Timoshenko, 1977) e tem a seguinte expressão:

$$y = \frac{3P \left(\frac{1}{\nu^2} - 1 \right) r^2}{16 \pi E \frac{1}{\nu^2} e^3}, \quad (7.1)$$

onde:

P — é a carga total (sendo p a pressão do solo $P = p \times \pi \times r^2$);

r — é o raio da membrana sensora;

ν — é o coeficiente de Poisson;

E — é o módulo de elasticidade;

e — é a espessura da membrana sensora.

Para uma dada geometria da membrana sensora e e r , constituída por um dado material de características E e ν , é possível estabelecer a relação entre o deslocamento y daquele ponto e a pressão do solo p :

$$y = f(p), \quad (7.2)$$

Um extensómetro de corda vibrante ligado ao centro do disco acusará uma deformação dada por:

$$\varepsilon = \frac{y}{l_{ref}}, \quad (7.3)$$

onde l_{ref} é o comprimento de referência da corda vibrante.

Pode então estabelecer-se uma expressão geral que relaciona a pressão do solo com a deformação do extensómetro dada por:

$$\varepsilon = f(p), \quad (7.4)$$

O facto de a célula de pressão apresentada na Figura 7.1 se destinar a ser encastrada no betão, obrigou a que tenham sido adoptadas um conjunto de medidas conducentes à não introdução de esforços no corpo da célula de pressão, quer numa fase inicial, durante as operações de betonagem, quer posteriormente, devido à deformação do betão resultante das acções a que está sujeito, como por exemplo, da retracção ou das variações de temperatura. Nomeadamente, através da interposição ao longo do perímetro de contacto da célula com o betão de materiais deformáveis, capazes de permitir a deformação do betão, sem que sejam introduzidos na célula de pressão esforços parasitas. A arquitectura deste sensor levanta algumas questões pertinentes. Por um lado a posição do transdutor de deslocamento, no exemplo acima materializado por um extensómetro, que nesta solução tem de ser forçosamente localizado atrás da membrana sensora. Esta localização, que será até uma boa solução no caso de se pretender um sensor de encastrar no betão, pode constituir uma séria limitação quando se pretende aplicar a célula a estruturas já existentes. Por outro lado o facto de a medição da deformação ser realizada apenas num ponto da membrana — o ponto central — torna-o muito vulnerável aos casos em que a pressão exercida sobre a membrana sensora não é perfeitamente uniforme.

Na Figura 7.2 apresenta-se um esquema de uma célula de pressão que constitui uma evolução do anterior. Neste caso, o espaço deixado vazio entre a membrana sensora e a estrutura de suporte que constitui o disco sensor, é preenchido por um fluído — em geral óleo no caso de solos e mercúrio no caso de rochas — e que está em contacto com um sensor de pressão instalado fora do disco sensor mas a uma curta distância deste, através de um tubo de aço. A deformação da membrana sensora provoca um aumento de pressão do fluído que é detectado pelo sensor de pressão. Em comparação com o desenho do sensor apresentado anteriormente (ver Figura 7.1) esta solução apresenta

algumas vantagens de entre as quais se salienta o facto de se medir a deformação de toda a membrana e não de apenas um dos seus pontos. É por isso um sensor menos sensível a pressões muito localizadas devidas, por exemplo, à heterogeneidade do material de aterro.

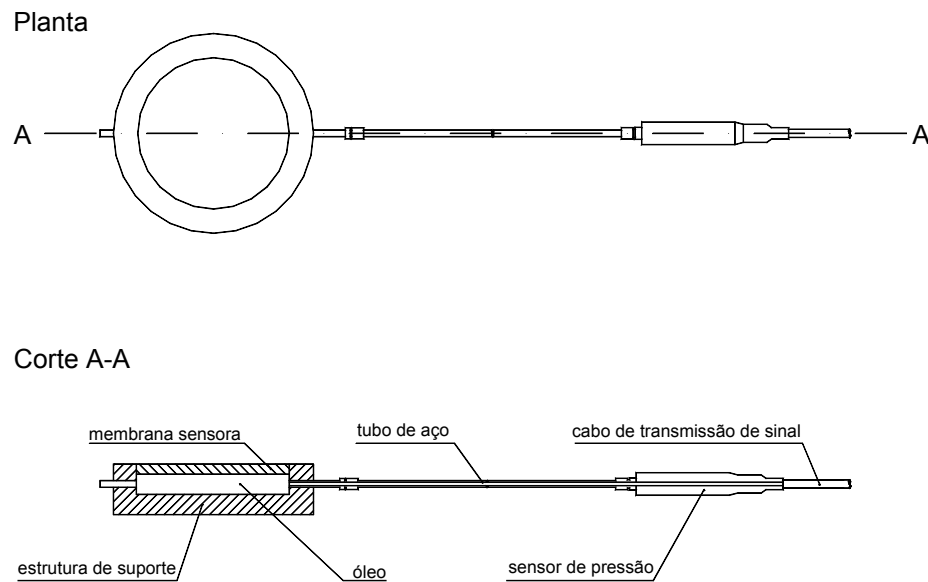


Figura 7.2 — Representação esquemática de um célula de pressão.

Nas gamas de medição de pressão baixas ou médias, compreendidas no intervalo de 0MPa a 5MPa, o fluido utilizado no preenchimento do disco sensor é o óleo. Nas gamas mais elevadas é utilizado o mercúrio, que permite a medição de pressões até 20MPa.

Conforme foi já referido, o sensor de pressão, que mede o valor da pressão a que o fluido está sujeito, é frequentemente resolvido com um sensor de corda vibrante ou de resistência.

Os sensores de pressão de corda vibrante apresentam uma boa estabilidade mas têm alguma sensibilidade à temperatura que pode afectar a medição em cerca de $\pm 0,02\%$ da escala completa. Daí que, prevendo-se importantes variações de temperatura, se recomende a instalação de um sensor de temperatura junto da célula de pressão. Admite-se contudo que variações de temperatura até 10°C não afectem significativamente a qualidade da medição. Nestes sensores, o valor da pressão do solo é dada pela expressão:

$$p = k \left[\left(f_i^2 \cdot 10 \times 10^{-8} \right) - \left(f_f^2 \cdot 10 \times 10^{-8} \right) \right], \quad (7.5)$$

onde:

p — é o valor da pressão do solo;

k — é uma constante de calibração da célula de pressão;

f_i — é o valor inicial da frequência de vibração da corda;

f_f — é o valor final da frequência de vibração da corda.

Quando são usados sensores de pressão eléctricos, consegue, em geral, obter-se uma melhor resolução e acuidade, mas em contrapartida a gama de temperatura de funcionamento é mais pequena.

Em termos comparativos, apresenta-se no Quadro 7.1 as principais características técnicas de dois sensores de pressão, da mesma marca, que associados a um mesmo disco sensor originam células de pressão de modelos diferentes. Uma delas incorporando um sensor de pressão de resistência, enquanto a outra um sensor de corda vibrante.

Quadro 7.1 — Principais características técnicas de dois sensores de pressão.

Característica	Sensor de resistência	Sensor de corda vibrante
Gama de medida	De 0kPa a 3MPa	De 0MPa a 7MPa
Resolução	0,01% FS	0,025% FS
Acuidade	<0,3% FS	<0,5% FS
Sinal de saída	De 4mA a 20mA	Frequência
Gama de temperatura de funcionamento	De -10°C até +55°C	De -20°C até +100°C
Material	Aço	Aço
Diâmetro	25mm	25mm
Comprimento	160mm	160mm
Peso	0,5kg	0,5kg

Na Figura 7.3 é apresentado o modelo 6P1.23 de uma célula de pressão, fabricado pela Soil Instruments Ltd., não para encastrar num elemento de betão, mas para aplicar à sua superfície. A

gama de medição desta célula de pressão é de 0kPa a 500kPa com uma acuidade de ± 10 kPa. O disco sensor tem 240mm de diâmetro exterior e 12mm de espessura. A face que contém a membrana sensora, que corresponde à face que vai estar em contacto com o solo, apresenta um ligeiro entalhe circular, bem visível na figura, que delimita a sua área, neste caso com 180mm de diâmetro. O tubo que liga o disco sensor ao sensor de pressão é em aço e tem 5mm de diâmetro exterior. O sensor de pressão, cujo funcionamento se baseia no princípio da corda vibrante, está no interior de uma peça cilíndrica, de 40mm de diâmetro exterior e 230mm de comprimento. O cabo de ligação é de dois fios com malha.



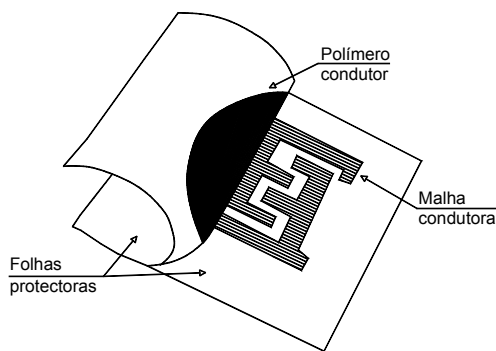
Figura 7.3 — Sensor de pressão de corda vibrante para aplicação à superfície.

Como as acções sobre o conjunto, célula de pressão/cabo são muito severas, principalmente aquando da colocação das primeiras camadas de aterro, a robustez é uma das características fundamentais a ter em conta no desenvolvimento de um sensor deste tipo. Daí que, por exemplo, a malha do cabo ser constituída por arames de 1mm de diâmetro. O disco sensor é ainda dotado de dois furos para fixação ao elemento estrutural para que, durante a fase de instalação, se desloque da sua posição inicial.

7.3 OUTRAS CÉLULAS DE PRESSÃO

Existem outras soluções no mercado para o desenvolvimento de sensores de pressão, com funcionamento diferente dos expostos anteriormente, embora não dedicados especificamente à engenharia civil, ou pelo menos, ainda não explorados nesta área. Um exemplo é o sensor de

pressão em polímero condutor apresentado na Figura 7.4. Sobre dois eléctrodos de prata em forma de grelha, assenta uma película de polímero condutor, que inclui na sua composição partículas condutoras ou semicondutoras, suspensas no substrato polimérico. A aplicação de uma pressão externa sobre o polímero, aumenta a condutância entre os dois eléctrodos. A solução comercial deste sensor de pressão desenvolvido pela Interlink Electronics, com apenas 18,5mm de diâmetro, apresenta uma resistência que varia de aproximadamente entre 2M Ω e 1k Ω para forças entre 10g e 10kg. Este sensor devidamente encapsulado pode ser uma solução interessante para medição de pressões que podem ir até cerca de 300kPa.



a) Princípio de funcionamento



b) Solução comercial da Interlink Electronics

Figura 7.4 — Sensor para desenvolvimento de detectores de força e pressão.

7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez instalada a célula de pressão, a deformação da membrana sensora, por acção da pressão exercida pelo solo, provoca uma redistribuição local desse mesmo valor da pressão, por efeito de arco do solo, migrando as pressões para as zonas menos deformáveis da célula, ou mesmo para a zona exterior à célula. Verifica-se que a rigidez à deformação da membrana sensora assume um papel fundamental no desenvolvimento destes sensores e tem sido objecto de estudo por parte de diversos autores (Tyler, 1976). Daí que, o conhecimento do funcionamento de uma célula de pressão não se esgota com um boa calibração mas, além disso, as condições de instalação em obra devem, tanto quanto possível, reproduzir as condições que em laboratório foram utilizadas para a sua calibração.

A calibração das célula de pressão é indispensável, não só devido a pequenas variações das propriedades dos materiais que a constituem, mas também para ter em atenção as tolerâncias

inerentes à sua execução. As operações de calibração são conduzidas submetendo a célula a uma pressão conhecida, geralmente conseguida através de ar ou de água. Para o efeito a célula deve estar devidamente apoiada, simulando as mesmas condições que se obtêm quando aplicadas em obra.

Uma questão essencial que se coloca na utilização de células de pressão é a da sua instalação. De uma correcta instalação depende em muito a qualidade das medidas que se vão realizar, nomeadamente, no que diz respeito à preparação da superfície onde vão ser instaladas, à sua fixação, ao material a utilizar nas primeiras camadas sobre a célula e ao seu grau de compactação.

CAPÍTULO 8

MEDIÇÃO DA INCLINAÇÃO

8.1 INTRODUÇÃO

Existem dois processos formalmente distintos para a medição da inclinação na observação de estruturas de engenharia civil. Um assenta na medição da variação angular de um dado eixo, entre a uma posição inicial e uma posição final. No segundo processo mede-se em cada momento o desvio angular de um dado eixo em relação a um plano de referência que é fixo, ou seja, medem-se inclinações absolutas. O plano de referência adoptado é, em geral, o horizontal ou o vertical.

O instrumento de medida destinado a medir variações angulares é designado clinómetro (do grego *klínein*, “incluir” + *métron*, “medida”). O instrumento de medida destinado a medir inclinações (absolutas) é o inclinómetro.

Os clinómetros foram os primeiros a surgir no mercado, destacando-se o clássico clinómetro de bolha de ar, já com largas décadas de utilização. Actualmente já existem disponíveis versões digitais deste instrumento de medida. Os inclinómetros são em geral eléctricos e mais recentemente têm experimentado algum desenvolvimento.

Não obstante a nova tecnologia emergente a utilização dos clinómetros de bolha de ar aplicados a bases devidamente fixadas à estrutura continua a ser o processo mais rápido, mais seguro e mais preciso de medir variações angulares. Existe uma grande tradição na utilização de clinómetros de bolha de ar na observação de estruturas (Marecos, 1979) sendo numerosas as referências específicas a estes sensores em bibliografia especializada de que são exemplo estruturas de edifícios de grande altura (Marecos e Castanheta, 1971), a Ponte sobre o Rio Nabão em Tomar (Marecos e Castanheta, 1973) ou muro cais da Setenave (Marecos e Fernandes, 1978). Mesmo em realizações

mais recentes, como na ponte Salgueiro Maia em Santarém, a observação durante os ensaios de carga estáticos e a observação durante a fase de exploração tem sido feita com recurso a este tipo de sensores.

A necessidade de se fazer deslocar um técnico ao local sempre que se pretenda proceder a uma medição, constitui uma das principais limitações do clinómetro de bolha de ar. Daí que em locais inacessíveis, ou quando se pretenda integrar a medição da variação angular num sistema automático, se recorra a inclinómetros eléctricos. As soluções de inclinómetros eléctricos disponíveis actualmente no mercado são de corda vibrante, indutivos ou resistivos.

Alternativamente, em secções de estruturas de difícil acesso, desde que visíveis, pode ainda medir-se a rotação de um dado segmento medindo distâncias a partir de um ponto fixo com a utilização, por exemplo, de equipamento laser.

8.2 CLINÓMETRO DE BOLHA DE AR

O clinómetro de bolha de ar é um instrumento de medida de variação angular, unidireccional, dotado de um mostrador de vidro em forma de calote esférica, no interior da qual a posição de uma bolha de ar indica a horizontalidade do sensor. O recipiente que contém a bolha de ar tem dois apoios, sendo um deles roscado, o que permite o seu nivelamento. Um tambor de medida, devidamente graduado, mede o número de voltas que é necessário dar ao apoio roscado, ao qual está ligado, para nivelar o sensor. Uma vez instalado numa base, devidamente fixada à estrutura, a variação angular é dada pelo número de voltas que é necessário dar ao tambor, para que seja reposta a horizontalidade do sensor.

O tambor de medida está dividido em partes, correspondendo uma volta completa a 360 divisões. Para cada clinómetro existe uma dada relação entre uma divisão do tambor, ou de uma volta completa do tambor, com a inclinação a que esse movimento diz respeito. Esta relação pode ser estabelecida por calibração em laboratório.

A Figura 8.1 apresenta um clinómetro de bolha de ar da marca Stoppani. A calibração deste sensor foi realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais da FEUP com recurso à definição de um triângulo de base fixa e altura variável. Para o efeito adoptou-se uma barra de 1000mm de comprimento, na qual foi instalado o clinómetro. Foram então impostas sucessivas variações de inclinação à barra, fixando uma das extremidades e medindo a distância percorrida pela outra (altura do triângulo). Para cada nova posição da barra registou-se o número de voltas completas e o número de divisões que era necessário imprimir ao tambor para reposicionar a bolha de ar no mostrador.

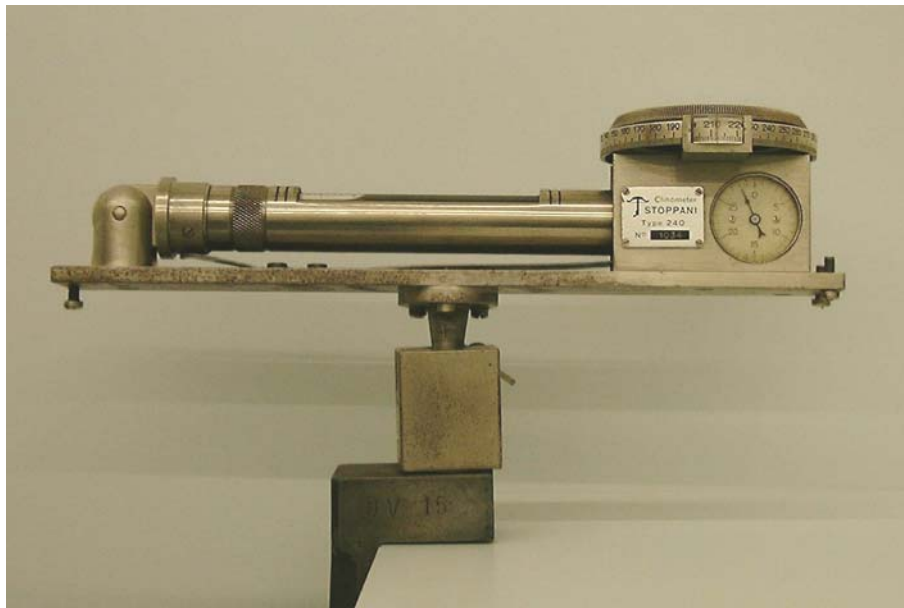


Figura 8.1 — Clinómetro de bolha de ar Stoppani.

No Quadro 8.1 são apresentados os passos essenciais seguidos na calibração deste sensor tendo-se concluído que a uma divisão do tambor equivale um segundo sexagesimal e que a uma volta completa do tambor correspondem seis minutos sexagesimais.

Verifica-se que a posição da bolha de ar no interior do mostrador é sensível a uma divisão do tambor, podendo mesmo dizer-se que o erro máximo de leitura será inferior a dois segundos sexagesimais. Na prática outros erros de leitura poderão ocorrer resultantes, por exemplo, de erros na leitura dos valores no tambor por parte do operador, ou da colocação deficiente do clinómetro na respectiva base de apoio.

A Figura 8.2 apresenta uma base de clinómetro, em aço, que é aplicada em obra aquando da betonagem do elemento estrutural, e sobre a qual é pousado o clinómetro, sempre que se pretenda fazer uma leitura. Dois elementos em V, devidamente rectificadados, garantem o encaixe perfeito dos dois apoios do clinómetro. Ao lado está a tampa, que foi previamente retirada da base, e que a protege desde a sua instalação. Como se compreende, as bases dos clinómetros constituem um elemento muito sensível da instalação de medida já que ficam permanentemente em obra e, em geral, em zonas muito acessíveis. Uma base danificada pode introduzir importantes erros de leitura ou mesmo inviabilizar leituras posteriores. Daí que apenas tampas em aço bem resistentes as protegem devidamente das acções mecânicas a que estão sujeitas, quer durante a construção, quer durante a fase de exploração da estrutura.

Quadro 8.1 — Valores impostos e valores medidos no clinómetro.

Base do triângulo – 1000mm		Leituras no clinómetro		Variação (leitura inicial – leitura corrente)	
Alturas do triângulo [mm]	tg α = =Altura/Base	Volta	Divisão	N.º de voltas	N.º de divisões
		0	0	30	066,8
4,0	0,0040	27	307,8	2	059,0
6	0,0060	26	265,9	3	100,9
10,8	0,0108	24	016,9	6	049,9
15,0	0,0150	21	234,8	8	132,0

Admitindo $\alpha \approx \text{tg}\alpha$ e tendo em atenção que cada volta do tambor em 360 divisões, pode escrever-se:

α [rad]	N.º total de divisões	Valor de 1 divisão do tambor [rad]
0,0040	$2 \times 360 + 059,0 = 779,0$	$0,0040 / 779,0 = 5,13 \times 10^{-6}$
0,0060	$3 \times 360 + 100,9 = 1180,9$	$0,0060 / 1180,9 = 5,08 \times 10^{-6}$
0,0108	$6 \times 360 + 049,9 = 2209,9$	$0,0108 / 2209,9 = 4,89 \times 10^{-6}$
0,0150	$8 \times 360 + 132,0 = 3012,0$	$0,0150 / 3012,0 = 4,98 \times 10^{-6}$

Pode então dizer-se que, em média, uma divisão do tambor do clinómetro equivale a $5,0 \times 10^{-6}$ rad, ou seja:

$$1 \text{ divisão} \Leftrightarrow 5,0 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

$$1 \text{ divisão} \Leftrightarrow 5,0 \times 10^{-6} \times 180 / \pi = 1,03''$$

$$1 \text{ volta completa do tambor} \Leftrightarrow 360 \text{ divisões} \Leftrightarrow 360 \times 1,03 = 370'' \approx 6,18'$$



Figura 8.2 — Base de inclinómetro e respectiva capa de protecção.

Nas campanhas de observação, em cada ponto de medida, é retirada a tampa e instalado na base o clinómetro de bolha de ar (ver Figura 8.3) . É rodado o tambor até que o sensor esteja de nível e registado o valor respectivo. A diferença entre este valor e o valor lido na campanha anterior indica a variação angular ocorrida naquele intervalo de tempo.



Figura 8.3 — Clinómetro de bolha de ar na base durante a operação de medição em obra.

8.3 INCLINÓMETROS ELÉTRICOS

Os inclinómetros eléctricos actualmente disponíveis no mercado não terão a precisão dos clinómetros de bolha de ar mas apresentam outras vantagens nomeadamente a possibilidade de serem integrados num sistema automático de aquisição. Não existe um princípio de funcionamento comum para todos eles. Cada fabricante desenvolveu o seu próprio sistema e nem todos anunciam de uma forma clara o seu funcionamento. Faz-se por isso de seguida, referência explícita a alguns modelos de inclinómetros, cujas propriedades apresentadas constam dos catálogos dos fabricantes respectivos.

A Figura 8.4 apresenta um inclinómetro eléctrico da RDP Electronics Ltd., que permite medir inclinações, numa dada direcção, em relação a um plano horizontal, com um campo de medida que pode ir desde $\pm 6^\circ$ até $\pm 30^\circ$. Essencialmente consiste na medição do movimento imposto a um pêndulo, que se desloca num meio viscoso, exibindo um movimento amortecido, quando a superfície de onde está suspenso, roda numa dada direcção. O pêndulo é constituído por uma haste de rigidez elástica que suspende um magneto de ferro de forma esférica. Quando o sensor está na posição

horizontal, o magneto encontra-se a igual distância de duas bobinas que o ladeiam. Uma rotação em relação à horizontal imposta ao sensor, reduz o espaço entre uma bobina e o magneto, com aumento simultâneo do espaço entre o magneto e a outra bobina. Deste modo a indutância de uma bobina aumenta enquanto que a da outra diminui. Um circuito electrónico converte esta variação num sinal em corrente contínua. O sinal de saída é linear em relação ao ângulo que o inclinómetro forma com a horizontal. É ainda dotado de um regulador interno de tensão que permite operar com uma fonte não regulada e o protege da inversão de polaridade.



Figura 8.4 — Inclinómetro eléctrico modelo 685B-10 da RDP Electronics, Limited.

Exteriormente é protegido por uma caixa de aço com dimensões exteriores de 95mm×41mm×58mm. A base está preparada para um sistema de fixação por parafusos, podendo ser aplicado directamente ao elemento estrutural ou através de uma cantoneira a ele fixada. O uso de uma cantoneira permite rodar de 90° o plano de referência em relação ao qual são medidas as inclinações.

Tomado por exemplo o modelo cujo campo de medida é de $\pm 15^\circ$, o erro máximo de leitura apresentado pelo fabricante é de $\pm 0,35\%$ do campo de medida, ou seja, aproximadamente seis minutos sexagesimais. Erros de leitura mais baixos são conseguidos à custa da redução do campo de medida.

Nos casos correntes da observação de superestruturas, o campo de medição de que é necessário dispor é em geral reduzido, dando-se maior importância aos erros cometidos na medição. Daí que, no caso dos inclinómetros, é preferível optar-se por sensores que apresentem o campo de medição estritamente necessário para a obra em análise. Um exemplo de um inclinómetro que apresenta um

campo de medição mais pequeno do que o anterior é o modelo KB-1AC, fabricado pela Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., cujas características principais estão resumidas no Quadro 8.2. Trata-se de um sensor que mede a inclinação em relação ao plano horizontal segundo duas direcções distintas, designando-se por isso de inclinómetro biaxial.

Quadro 8.2 — Características técnicas do inclinómetro eléctrico modelo KB-1AC.

N.º de eixos de medida	2 eixos (biaxial)
Campo de medida	$\pm 1^\circ$
Ampliação	1mV/V
Não linearidade	0,5%
Sensibilidade transversal	2%
Gama de temperatura de funcionamento	-20°C a +60°C
Resistência	350Ω
Tensão de excitação recomendada	Inferior a 2V
Tensão máxima admissível	5V

Devido apenas à não linearidade, que é de 0,5% do campo de medição, com este sensor não conseguimos medir em cada direcção melhor do que 36" sexagesimais. De salientar que a inclinação numa dada direcção pode afectar a medição na outra direcção em 2% do valor medido.

A sua ligação ao sistema de aquisição em circuito de ponte de Wheatstone permite concluir que se trata de um sensor resistivo, tendo-se estabelecido uma relação linear entre o sinal de saída da ponte e a sua inclinação em relação ao plano horizontal.

A Figura 8.5 ilustra uma aplicação em obra de um inclinómetro eléctrico, modelo KB-5D, também produzido pela Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., com uma gama de medida de $\pm 5^\circ$. Trata-se de um modelo uniaxial, ou seja, apenas permite medir inclinações numa dada direcção, e está especialmente indicado para a monitorização a longo prazo, do comportamento estrutural.



Figura 8.5 — Inclinómetro eléctrico aplicado em obra.

Existem outros tipos de inclinómetros eléctricos, que costumam ser usados na medição de inclinações em barragens ou em obras geotécnicas. Deslizam no interior de tubos pré-instalados no maciço, podendo medir inclinações em diversos pontos ao longo desse trajecto. É neste tipo de aplicações que são usuais, além dos inclinómetros resistivos, os de corda vibrante.

CAPÍTULO 9

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

9.1 INTRODUÇÃO

A observação de estruturas de Engenharia Civil tem evidenciado recentemente uma grande evolução quer na automatização da aquisição dos dados, quer no desenvolvimento e no aperfeiçoamento dos instrumentos de medida, tornando-os cada vez mais precisos, resistentes e económicos.

Neste contexto, os sensores de Bragg em fibra óptica (SBFO) surgem como um avanço tecnológico importante. De facto, esta tecnologia tem vindo a ser aplicada ao domínio das Engenharia Civil com inúmeras vantagens. Numerosos ensaios continuam entretanto a ser realizados, com vista ao seu desenvolvimento. A validação desta nova família de sensores tem sido efectuada por comparação com sensores tradicionais para os quais existe já uma vasta experiência adquirida (Félix et al., 2000). O objectivo é adquirir confiança e experiência na utilização dos SBFO de forma a potenciar as indiscutíveis vantagens por eles demonstradas.

Na área da Engenharia Civil têm sido desenvolvidos SBFO para inserir no interior de polímeros reforçados com fibras de carbono e com fibras de vidro (Kalamkarov, 1998), colados e aplicados à superfície de provetes de aço e de betão (Moerman et al., 1999).

A tecnologia dos sensores de fibra tem já sido aplicada com sucesso na monitorização de barragens, de que são exemplo as barragens de Schiffenen e de Emosson, na Suíça (Kronenberg, 1997), e de pontes, como a ponte de Taylor em Manitoba, no Canadá (Rizkalla e Shehata, 1999), ou as pontes de Venoge (Inaudi, Vurpillot e Casanova, 1996) e de Versoix (Inaudi, Casanova e Vurpillot, 1999), na Suíça. Estes sensores têm permitido obter informação essencial acerca do comportamento dessas

obras ao longo do tempo. Nestas aplicações tem-se procurado avaliar a influência das variações de temperatura e dos processos de fixação às estruturas no desempenho dos sensores.

Também têm sido realizados estudos no domínio da dinâmica (Arduini et al., 1999 e Davis et al., 1997). Será esta, porventura uma das aplicações mais aliantes das redes de Bragg, dada a elevada frequência de resposta e de transmissão de sinal. Davis et al. (1997) apresentaram interessantes resultados da monitorização com sensores de Bragg da ponte I-10 em Las Cruces no Novo México. Trata-se da instalação de um conjunto de sensores na ponte, ainda em fase experimental, mas que permitiu desde já concluir da elevada precisão dos resultados obtidos e das vantagens desta nova geração de sensores quando comparada com os sistemas tradicionais.

Paralelamente têm sido desenvolvidos sistemas de aquisição de sinal e de armazenamento e transmissão de dados mais ou menos sofisticados, com vista à observação e controlo remoto das estruturas (Moerman et al., 1999 e Arduini et al., 1999). Estes sistemas, dadas as suas potencialidades, têm permitido desenvolver o conceito de estruturas inteligentes. Os resultados são encorajadores e têm demonstrado as potencialidades desta nova família de sensores.

9.2 FUNCIONAMENTO DOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

9.2.1 Princípio de funcionamento

As alterações físicas ou ambientais provocam em geral variações na fase, na intensidade, no comprimento de onda ou na polarização da luz propagada através de uma fibra óptica, a partir das quais é possível extrair informação acerca dos parâmetros a medir. Esta característica das fibras ópticas tem sido aplicada no desenvolvimento de sensores que permitem a medição, entre outros, da deformação mecânica, da temperatura, do nível de PH no betão fresco ou da humidade no interior da massa de betão.

A tecnologia das redes de Bragg em fibra óptica teve a sua origem na descoberta da fotossensibilidade das fibras ópticas por Hill et al. em 1978 (Hill et al., 1978). Verificou-se ser possível fotoinduzir uma modulação periódica permanente do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica fotossensível, que actua essencialmente como um espelho selectivo em comprimento de onda. Refira-se que as técnicas de fabricação destes dispositivos têm experimentado grande desenvolvimento no sentido de se obterem sensores duráveis e a custos razoáveis.

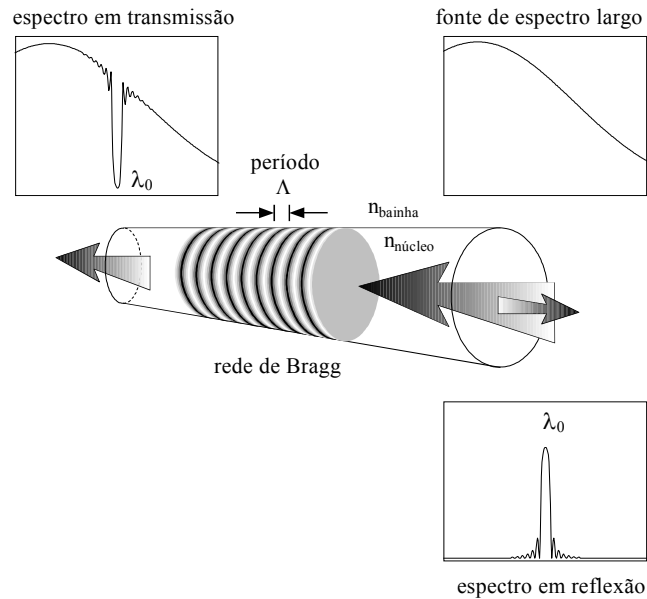


Figura 9.1 — Representação esquemática do princípio de funcionamento das redes de Bragg.

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

$$\lambda_0 = 2 \times n_{efc} \times \Lambda , \quad (9.1)$$

onde:

n_{efc} — é o índice efectivo do modo guiado;

Λ — é o período de modulação da rede de Bragg.

A variação $\Delta\lambda$ do comprimento de onda ressonante de um sensor de Bragg pode resultar de alterações induzidas no período de modulação da rede Λ ou de perturbações do índice efectivo do modo guiado n_{efc} . Qualquer uma destas alterações está relacionada com variações de deformação ou com variações de temperatura a que o sensor está sujeito (Maaskant et al., 1997). Para aplicações práticas pode escrever-se:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = GF \times \varepsilon_1 + \beta \times \Delta T , \quad (9.2)$$

onde:

ε_1 — é a deformação axial ou extensão;

ΔT — é a variação de temperatura;

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

Os sensores de fibra óptica com base em redes de Bragg são particularmente atractivos já que é possível numa mesma fibra integrar diversos sensores, bastando para isso definir para cada rede períodos de modulação distintos. O espectro de reflexão associado a cada rede apresenta assim comprimentos de onda diferentes, permitindo identificar a que sensor diz respeito. Esta propriedade torna simples a multiplexagem de sensores de Bragg instalados ao longo de uma rede de sensores quase-distribuídos.

9.2.2 Principais vantagens

Os SBFO oferecem um conjunto único de vantagens quando comparados com os sensores convencionais que funcionam com corrente eléctrica. Nomeadamente são insensíveis aos campos electromagnéticos, podem ser de pequenas dimensões, apresentam reduzida perda de sinal e elevada resistência à corrosão. A utilização das redes de Bragg tem ainda a vantagem de ao longo da mesma fibra óptica poder ser instalado um conjunto quase ilimitado de sensores.

De acordo com a equação (9.2), o comprimento de onda da luz reflectida é função das grandezas a medir, ou seja, da extensão e da temperatura, sendo esta propriedade da luz independente das perdas que possam existir ao longo da fibra. Uma das particularidades mais atractivas dos SBFO é o facto de a fibra óptica onde está impresso o sensor ser também o meio de transmissão do sinal.

9.2.3 Sensores de fibra óptica desenvolvidos

A Figura 9.2 apresenta um protótipo de um sensor de fibra óptica baseado em redes de Bragg, desenvolvido conjuntamente pela Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos do INESC Porto e pelo Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da U. P.. Trata-se de um sensor destinado a ser embebido no betão, sendo por isso instalado no elemento estrutural antes da fase de betonagem. O sensor é constituído por um corpo ou invólucro exterior e por duas fibras ópticas contendo sensores de Bragg instaladas no seu interior. O corpo do sensor tem por função transmitir às fibras ópticas a deformação do betão e de as proteger durante as fases de instalação e de betonagem. É composto por um tubo de fibra de 100mm de comprimento e 13mm de diâmetro exterior, roscado nas extremidades, às quais são ligados dois discos com 40mm de diâmetro e 2mm de espessura. Sendo desprezável o atrito desenvolvido ao longo do corpo do sensor, as deformações

do betão são impostas ao sensor essencialmente através dos discos extremos, aos quais estão fixadas as fibras ópticas.

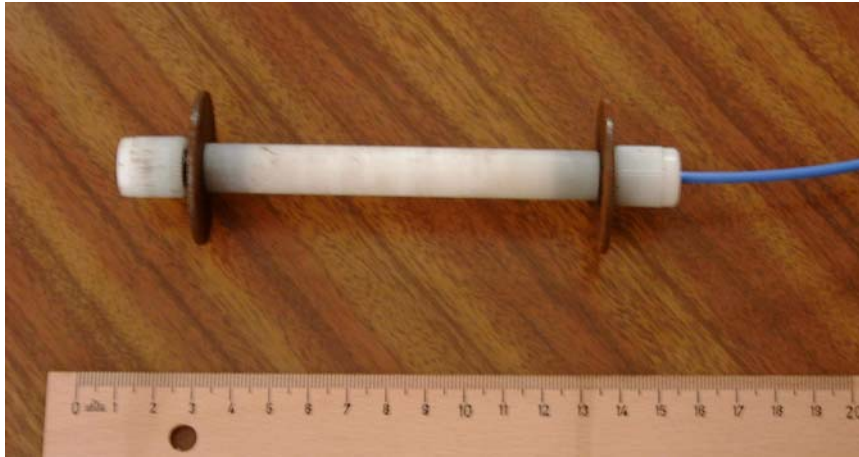


Figura 9.2 — Sensor de fibra óptica para embeber no betão.

No interior do sensor uma das fibras, designada fibra activa, é previamente traccionada e solidarizada com ambas as extremidades do sensor. A segunda fibra, designada fibra de referência, está ligada apenas a uma das extremidades. Esta fibra óptica, como não está sujeita a deformações, permite compensar as variações de temperatura comuns aos dois sensores de Bragg.



Figura 9.3 — Sensor de fibra óptica de superfície.

Na Figura 9.3 apresenta-se uma outra versão do mesmo sensor, mas vocacionado para aplicação na superfície do elemento estrutural a observar. A grande diferença em relação ao sensor descrito anteriormente reside no desenho do sistema de fixação. Tal como no SBFO para embeber no betão, o corpo é constituído por um tubo de fibra de 13mm de diâmetro exterior. Às extremidades são associadas duas peças de aço que permitem ligar o sensor ao elemento estrutural e através de dois parafusos cada. O comprimento de referência do sensor, que corresponde à distância entre pontos de fixação, é neste caso de 220mm. Uma das extremidades é fixa, ou seja, liga rigidamente a cabeça sensora ao elemento estrutural (ver extremidade direita do sensor representado na Figura 9.3). A

outra extremidade possui um sistema de ajuste de tensão da fibra óptica, que pode ser utilizado depois do sensor estar aparafusado à estrutura. Após a instalação a fibra óptica fica a cerca de 20mm da superfície do elemento estrutural. Este sensor está especialmente vocacionado para a monitorização de estruturas já existentes, quer estas sejam de betão, de aço ou mesmo de outro material estrutural. Em relação aos SBFO para embeber, o sensor de superfície apresenta a vantagem de poder ser instalado, retirado ou substituído em qualquer altura. Apresenta, no entanto, a desvantagem de estar mais exposto a acções de acidente, sendo por isso mais vulnerável a acções de acidente.

9.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO LABORATORIAL

9.3.1 Introdução

Com o objectivo de validar os resultados obtidos a partir dos SBFO (Félix e Figueiras, 1999) procedeu-se a um ensaio à compressão simples dum prisma de betão no qual foram instalados, além de um SBFO, outros dois tipos de sensores convencionais, para os quais existe já ampla experiência de utilização.

9.3.2 Preparação dos provetes

Foi realizado um betão com cimento portland normal, brita e areia médias, com uma relação de A/C aproximadamente 0,45 e de I/C de 3,90. Com este betão preparou-se um provete de dimensões 150mm × 150mm × 525mm utilizado no ensaio de compressão simples, assim como um outro conjunto de provetes cúbicos e cilíndricos, com vista à determinação dos parâmetros de deformabilidade e de resistência do material.



Figura 9.4 — Extensómetro eléctrico posicionado no provete antes da betonagem.

No exemplo em análise foi utilizado o SBFO de superfície descrito anteriormente. Conjuntamente foram utilizados mais dois tipos de sensores convencionais que permitiram, no decorrer do ensaio, obter igualmente valores de deformação do prisma. No interior do prisma, cuja preparação se representa na Figura 9.4, foi instalado um extensómetro de resistência eléctrica (ERE) de embeber no betão, fabricado pela Measurements Group da série EGP-5-120. Exteriormente foram aplicados dois transdutores digitais de deslocamento, um em cada uma das faces opostas, e a meia altura do prisma, conforme se representa na Figura 9.5. Os transdutores permitiram medir o deslocamento relativo entre dois pontos, neste caso afastados entre si de cerca de 200mm.



Figura 9.5 — Pormenor dos sensores externos instalados no provete prismático.

9.3.3 Condução do ensaio

À data da realização do ensaio o betão apresentava 14 dias de idade. Realizaram-se ensaios de caracterização do betão a partir dos quais foi possível estimar um módulo de elasticidade, $E_{c,14} = 27,5\text{GPa}$ e uma tensão de rotura à compressão $f_{ck,14} = 25\text{MPa}$.

O ensaio foi conduzido submetendo o provete prismático a um ensaio de compressão simples com ciclos consecutivos de carga e de descarga. O valor da carga atingido em cada ciclo foi de aproximadamente 225kN, correspondendo a cerca de 40% do valor da tensão de rotura do betão à data de realização do ensaio. A Figura 9.6 documenta algumas fases do ensaio.



Figura 9.6 — Ensaio de compressão simples do provete prismático (vista geral).

9.3.4 Resultados obtidos

No decorrer do ensaio foi aplicado ao prisma a carga máxima de 225kN a que corresponde a tensão $\sigma_c = 10\text{MPa}$. Admitindo o comportamento elástico linear para este nível de tensão, é possível estimar o respectivo valor da deformação do betão dado por:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_{c,14}} = \frac{10}{27,5 \times 10^3} = 364 \times 10^{-6} \text{ m/m}. \quad (9.3)$$

A Figura 9.7 apresenta a relação encontrada entre a tensão e as extensões verificadas num dos ciclos de carga/descarga, tendo as extensões do provete sido obtidas a partir do extensómetro de resistência eléctrica (ERE), dos transdutores de deslocamento (TDD) e do sensor de fibra óptica (SBFO).

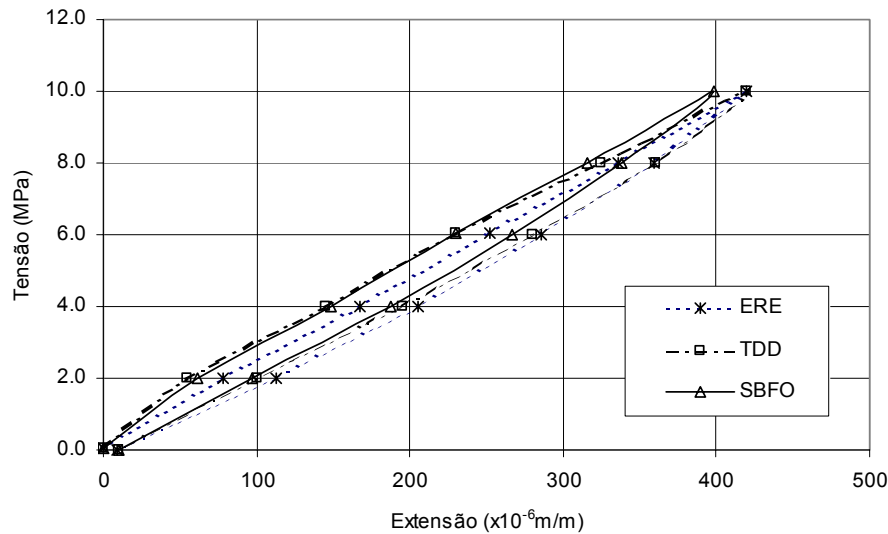


Figura 9.7 — Resultado do ensaio de compressão simples do provete prismático.

No conjunto dos diversos ciclos de carga / descarga o valor médio da extensão máxima medido pelo SBFO foi de $400\mu\epsilon$. Da análise dos resultados verifica-se que existe uma notável concordância entre o SBFO e os restantes sensores utilizados na medição da deformação do provete. De referir ainda a razoável concordância com o valor estimado numericamente.

9.4 OUTROS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

O desenvolvimento dos sensores de fibra óptica conduziu, mais recentemente, à aplicação desta nova geração de sensores à medição de diversas grandezas na área da engenharia civil. Tendo em atenção as vantagens que lhe estão associadas, conhecerão certamente, num futuro muito próximo, um largo campo de aplicação.

Refira-se, por exemplo, a I.D.FOS Research, que já comercializa uma vasta família destes instrumentos, desenvolvidos com base nos sensores de rede de Bragg em fibra óptica.

A Figura 9.8 ilustra o exemplo de uma célula de pressão. O princípio de funcionamento é muito semelhante às células de pressão de corda vibrante descritas no Capítulo 7. O disco sensor, que na figura tem a forma rectangular, é de aço e armazena um fluído que está em contacto com um sensor de pressão através de um tubo, também de aço. Neste caso, o sensor de pressão, que anteriormente era de corda vibrante, foi substituído por um sensor em fibra óptica.

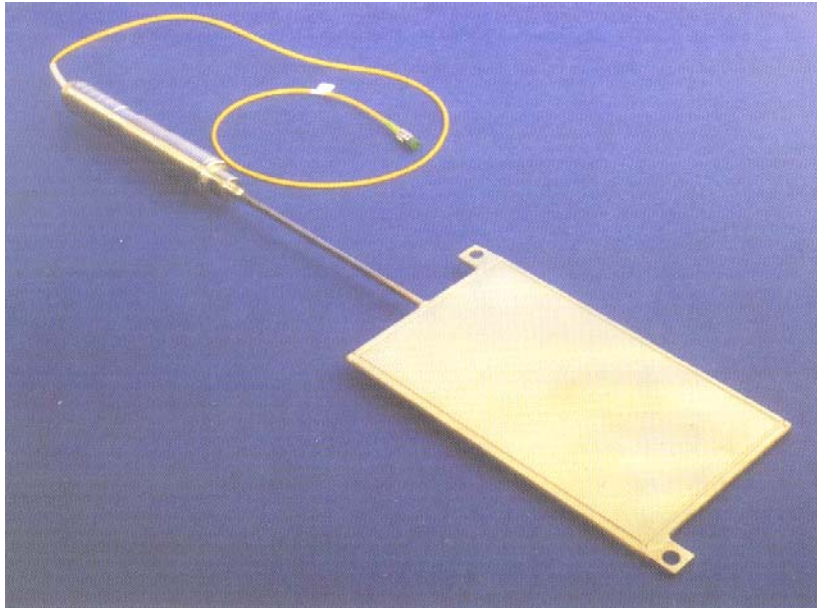


Figura 9.8 — Célula de pressão em fibra óptica.

Mais recentemente (Chang et al., 2000) foi desenvolvida uma célula de pressão, com base nas redes de Bragg, para medição da pressão aplicada a um pavimento. Um disco de alumínio, de 38mm de diâmetro e 1mm de espessura, que constitui a membrana sensora, é rigidamente ligada a uma base, que inclui um anel de rigidez que lhe serve de apoio, formando uma caixa cilíndrica fechada de pequena altura. Na face interior do disco sensor foi colado um sensor de Bragg em fibra óptica, que permite medir a extensão do ponto central do disco. Foi estabelecida uma relação entre o valor da pressão aplicada membrana sensora e a extensão indicada pelo sensor de Bragg.

CAPÍTULO 10

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO A ESTRUTURAS DE BETÃO

10.1 INTRODUÇÃO

A monitorização do comportamento estrutural concretiza-se em obra com a instalação dos sensores e do sistema de aquisição processamento e transmissão de informação. Trata-se de uma fase de intervenção particularmente delicada, atendendo a um conjunto significativo de condicionalismos resultantes da actividade normal da vida de uma obra. São exemplo destes condicionalismos, a alteração frequente da calendarização do faseamento construtivo, dependente muitas vezes das condições atmosféricas, as condições de acesso ao local da obra e às secções instrumentadas, os constrangimentos resultantes da movimentação de pessoal e de máquinas.

No presente capítulo apresentam-se alguns exemplos de aplicação em obra de sistemas que permitem a medição de grandezas, relevantes para cada uma das obras em causa. Estes trabalhos de monitorização têm sido levados a efeito pelo Laboratório de Estruturas da FEUP, com o qual o autor tem colaborado.

No primeiro exemplo são medidos deslocamentos relativos entre pares de pontos, localizados no interior de uma passagem hidráulica enterrada, durante a fase de execução e de posterior carregamento com uma carga de valor conhecido. Após a condução do ensaio de carga todo o equipamento de medição foi retirado. Nestas condições não se pode afirmar que a esta estrutura foi aplicado um sistema de monitorização. No entanto, a condução deste ensaio, foi importante para o estudo do comportamento estrutural de estruturas enterradas, que resultou na elaboração de um

segundo plano de observação. É a aplicação deste novo plano de observação, ainda em curso, que constitui o segundo exemplo de aplicação.

Finalmente, descreve-se a aplicação de dois sistemas de monitorização estrutural, um projectado para ser aplicado à Ponte Infante D. Henrique, no Porto, e o segundo, ao Viaduto sobre a Via de Cintura Interna, também no Porto. O facto de ambas as obras estarem ainda em curso, não permite a apresentação de resultados de medição, nem tão pouco, da sua interpretação. Contudo, no contexto do presente trabalho, e dada a importância dos trabalhos em curso, considera-se relevante a apresentação dos sistemas de monitorização propostos e a descrição das primeiras fase de aplicação em obra.

10.2 MONITORIZAÇÃO DE UMA BOX-CULVERT DURANTE A CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE CARGA

10.2.1 Introdução

A interacção solo/estrutura evidenciada em estruturas enterradas, torna o seu comportamento estrutural complexo. Nomeadamente no que diz respeito à avaliação do valor da pressão exercida pelo solo envolvente e à transmissão à estrutura das acções variáveis aplicadas no terraplano. Neste contexto, o dimensionamento e a verificação da segurança de Passagens Hidráulicas (PH), constituídas por elementos de betão pré-fabricado, recorre a modelos simplificados, que têm experimentado evoluções ao longo dos últimos anos (Sang, 2000).

Com o objectivo de aferir os modelos simplificados e de propor algumas recomendações no que diz respeito à solução estrutural, procedeu-se à monitorização do comportamento de uma box-culvert (BC), durante a fase construtiva de colocação do material de aterro, e durante uma fase posterior de exploração, com o recurso a um veículo de carga previamente pesado (Félix e Figueiras, 1999).

O ensaio incide sobre uma secção de uma PH, sendo descrita de seguida a secção instrumentada e o sistema de monitorização adoptado. Apresenta-se o sistema construtivo desta obra e as fases subsequentes de carga a que foi sujeita. Resumem-se os principais valores medidos dos deslocamentos relativos, entre pontos seleccionados da estrutura, por meio de LVDT's. A selecção de uma Passagem Hidráulica com uma reduzida altura de aterro fez com que a acção do veículo fosse condicionante na observação do comportamento dos elementos pré-fabricados durante o ensaio de carga.

10.2.2 Descrição da secção instrumentada

A Passagem Hidráulica objecto do presente estudo, foi realizada na A6 – Auto-estrada Marateca/Elvas, Sublanço Estremoz/Borba e é constituída por elementos pré-fabricados box-culvert XXL.75, fornecidos pela empresa Maprel (ver Figura 10.1).

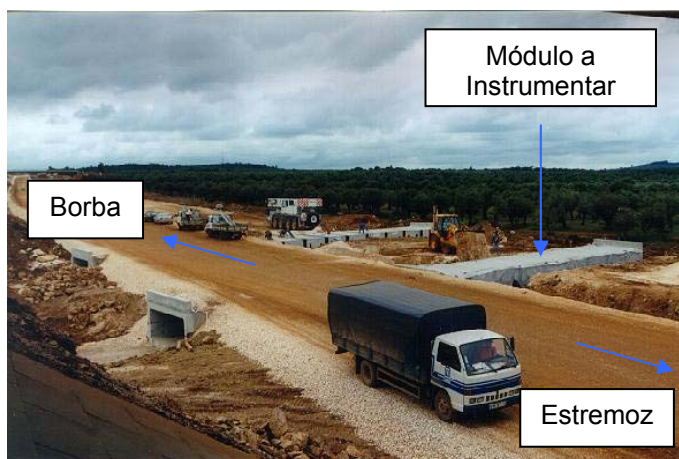


Figura 10.1 — Vista geral da obra.

A PH é formada por pares de peças em “U” em betão armado, que se sobrepõem a partir de um sistema de encaixe tipo macho-fêmea (ver Figura 10.2). Este esquema de encaixe garante o funcionamento conjunto dos montantes (paredes laterais) face à actuação das acções exteriores. Os materiais utilizados nestes elementos pré-fabricados são o betão da classe C30/37 e o aço A400NR.

A secção transversal apresenta 4,04m x 2,0m de dimensões exteriores e 3,5m x 1,5m de dimensões interiores. Longitudinalmente o módulo da BC instrumentado apresenta 2,5m de desenvolvimento. As travessas superior e inferior apresentam uma espessura constante de 0,25m e os montantes uma espessura variando linearmente de 0,25m na zona de encaixe dos dois elementos “U” e 0,27m junto às travessas.

O eixo da PH forma um ângulo de 87,80 grados com o eixo da Auto-estrada no ponto de cruzamento.

A diferença de cotas entre a face superior da BC e o betuminoso na zona do módulo instrumentado é de aproximadamente 0,80m a que corresponde uma altura de material de aterro de aproximadamente 0,40m.

A observação foi realizada com base na instrumentação de um dos módulos, constituído pelas duas peças em “U”, desde a sua instalação e colocação do material de aterro envolvente até aos ensaios

de carga com um camião carregado com terras. O módulo instrumentado localiza-se aproximadamente ao eixo da faixa Estremoz / Borba.

10.2.3 Faseamento construtivo

As fases de execução desta obra, pertinentes para os objectivos em análise, podem ser resumidas do seguinte modo:

1ª fase – Colocação dos elementos pré-fabricados (ver Figura 10.2) e respectiva selagem das juntas com tela asfáltica (ver Figura 10.3);



Figura 10.2 — Colocação dos elementos pré-fabricados.



Figura 10.3 — Selagem das juntas com tela asfáltica.



Figura 10.4 — Drenagem do tardo dos montantes da BC.

2ª fase – Execução do sistema de drenagem do tardo dos montantes da BC, constituído por um geodreno tipo Wavin Glassidren circular Ø 65mm, envolvido por uma camada de brita, e exteriormente por uma manta geotextil 200g/m² (ver Figura 10.4);

3ª fase – Colocação alternada de cada um dos lados da estrutura de camadas de material de aterro com alturas máximas de 0,75m (ver Figura 10.5);



Figura 10.5 — Colocação do material de aterro na zona lateral da estrutura.

Dificuldades diversas na compactação do material de aterro junto ao paramento da estrutura, de que se salientam a falta de espaço e as condições climáticas, conduziram a que o seu adensamento tenha sido conseguido por percolação de quantidades apreciáveis de água, para o efeito depositada no local (ver Figura 10.6).

4ª fase – Colocação do material de aterro sobre a estrutura que inclui a sua compactação mecânica, através de um cilindro vibrador.



Figura 10.6 — Adensamento do material de aterro por percolação.

10.2.4 Ensaio de carga

Com o objectivo de observar o comportamento da estrutura quando solicitada pelo tráfego rodoviário, foi utilizado um camião carregado com terra (ver Figura 10.7), devidamente pesado, com as características descritas na Figura 10.8 e no Quadro 10.1.



Figura 10.7 — Veículo utilizado no ensaio de carga.

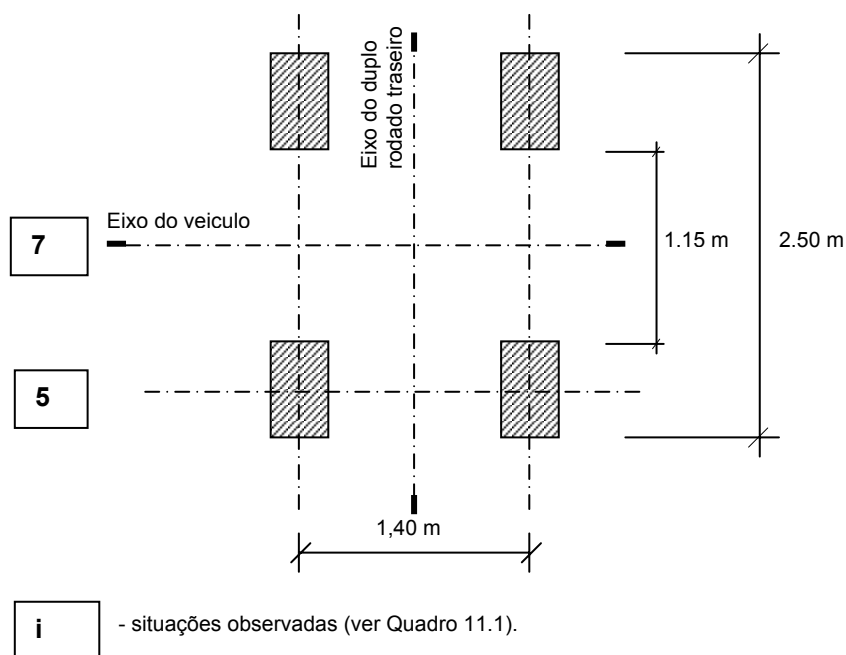


Figura 10.8 — Dimensões em planta do eixo traseiro do camião.

Quadro 10.1 — Peso por eixo do camião.

	Peso [kg]	Peso aprox. [kN]
ED – eixo dianteiro	10 010	100
ET – duplo eixo traseiro	26 590	266
Total	36 600	366

No decorrer do ensaio procurou colocar-se o eixo traseiro do veículo em diversas posições, consideradas mais desfavoráveis para a estrutura em análise.

A altura do material de aterro acima da BC que definiu a superfície de rolamento do camião, à data de execução do ensaio, era de aproximadamente 0,40m.

10.2.5 Sistema de observação

Na observação do comportamento estrutural foi feita a medição de deslocamentos entre pontos seleccionados com recurso a LVDT's. Foram instalados no interior da BC 10 LVDT's em tripés próprios conforme se pode ver na Figura 10.9. Os LVDT's foram numerados de 1 a 10.

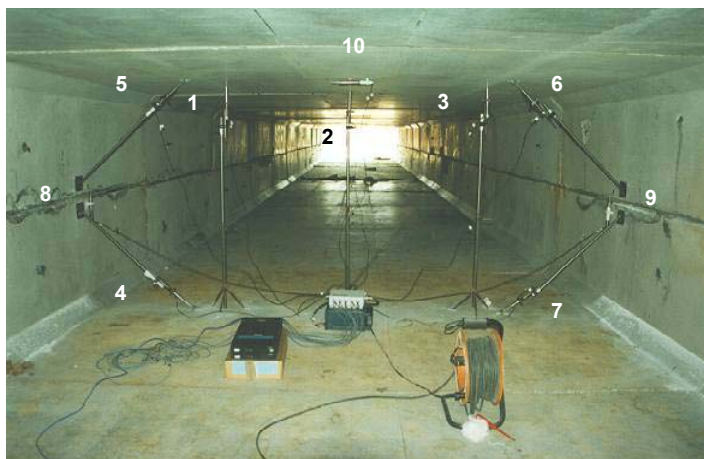


Figura 10.9 — Disposição dos LVDT's no interior da BC (vista geral).

Os LVDT's 1 a 3 permitem observar o deslocamento total entre a face superior e a face inferior da BC. Os LVDT's 4 a 7 permitem obter os deslocamentos horizontais relativos das faces laterais da BC. Os LVDT's 8 e 9 controlam os deslocamentos da junta de construção resultantes por um lado do ajuste dos módulos superior e inferior da BC e por outro da rotação sofrida pelos montantes que neste ponto se comporta como uma rótula. O LVDT 10 permite obter a extensão máxima da face inferior do módulo superior da BC, confirmando os resultados obtidos pelos restantes LVDT's, e indicando possível fendilhação que se forme. A Figura 10.10 apresenta um pormenor dos LVDT 2 e 10, e a Figura 10.11 do LVDT 9.

Para a aquisição, condicionamento e transmissão de sinal para o PC foram utilizados os IMP's (sigla de isolated measurement pod), fabricados pela empresa Schlumberger Instruments. Este equipamento tem a particularidade de converter junto do próprio sensor, o sinal eléctrico em sinal digital. A transmissão de sinal até ao PC é feita ao longo de uma rede digital tornando possível que sejam percorridas distâncias apreciáveis sem perda de sinal.

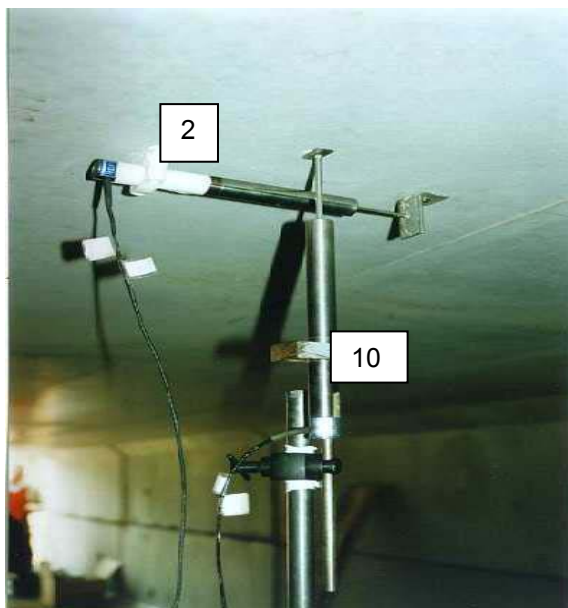


Figura 10.10 — Pormenor dos LVDT's 2 e 10.



Figura 10.11 — Pormenor do LVDT 9.



Figura 10.12 — IMP, concentrador de sinal e fonte de alimentação.

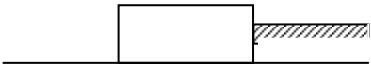
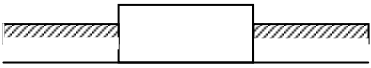
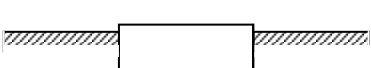
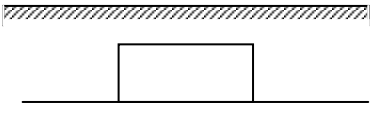
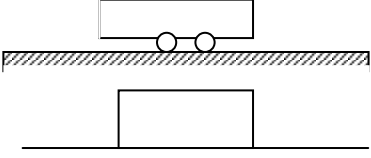
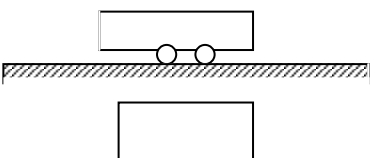
Completa este sistema o programa *Maestru 1.0* (Teixeira, 1999), especialmente desenvolvido na FEUP, DEEC, para servir de base a este sistema de observação de estruturas. O programa *Maestru* destina-se à aquisição autónoma ou supervisionada, ao tratamento e à visualização dos dados fornecidos pelos módulos IMP's. Estes dados, que no decorrer do ensaio podem ser visualizados sob a forma de gráfico, podem também ser exportados sob a forma de folha de cálculo para posterior tratamento.

No exemplo em apreço, a execução e posterior carregamento da BC foi muito bem delimitado no tempo, pelo que foi possível recorrer a este sistema de aquisição, com algumas limitações de autonomia, nomeadamente no que diz respeito à necessidade de alimentação com corrente eléctrica de 220V.

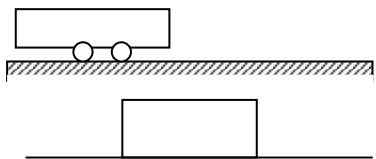
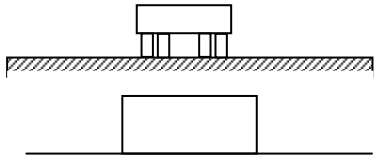
10.2.6 Observações

No decorrer do ensaio foram lidos os valores dos deslocamentos nos 10 LVDT's em 11 situações distintas, que vão desde a colocação do material de aterro no tardos dos montantes da BC até aos ensaios de carga levados a efeito com recurso ao veículo descrito anteriormente. Cada uma destas situações de ensaio corresponde a um caso de carga resumido no Quadro 10.2.

Quadro 10.2 — Descrição das situações observadas.

Caso de carga	Descrição	Representação esquemática
1	Aproximadamente 0,75m de aterro no lado direito da BC e 0m no lado esquerdo.	
2	Aproximadamente 0,75m de aterro em ambos os lados da BC.	
3	Aproximadamente 1,5m de aterro em ambos os lados da BC.	
4	Aterro colocado até aproximadamente 0,40m acima da face superior da BC (final da construção).	
5	Duas rodas do eixo traseiro centradas em planta no elemento da BC (ver Figura 10.8).	
6	Sem veículo.	
7	As quatro rodas do eixo traseiro centradas em planta no elemento da BC (ver Figura 10.8).	

Quadro 10.2 (continuação) – Descrição das situações observadas.

Caso de carga	Descrição	Representação esquemática
8	Sem veículo.	
9	Camião posicionado no limite da BC.	
10	Eixo longitudinal do veículo colocado transversalmente ao eixo da via com as 4 rodas do eixo traseiro centradas em planta com a BC.	
11	Sem veículo (após a realização dos ensaios).	

Os casos de carga 1 a 4 correspondem a diversas fases de execução da obra. Sucedem-se depois 3 casos de carga em que o veículo assume diferentes posições sobre a BC (casos de carga 5, 7 e 10) e um caso de carga em que o veículo é posicionado ao lado da BC mas tão próximo desta quanto possível, provocando-lhe impulsos máximos nas paredes dos montantes (caso de carga 9). Após cada uma destas situações de carregamento, foi retirada a acção provocada pelo veículo, sucedendo-se fases de descarga. Também nestas fases de descarga (casos de carga 6, 8 e 11) foram recolhidos os valores dos deslocamentos nos LVDT's. Este procedimento permitiu observar a evolução da deformação da estrutura antes, durante e após a acção do veículo.

Apresenta-se no Quadro 10.3 os valores dos deslocamentos lidos nos 10 LVDT's para cada uma das situações descritas anteriormente.

Não obstante a aparente simetria da estrutura, do carregamento e da disposição dos sensores de deslocamento, os resultados que a seguir se apresentam são reveladores duma certa assimetria de comportamento. Este comportamento não simétrico da estrutura, que conforme adiante se constatará, é muito ligeiro (variações da ordem da centésimas ou das milésimas de milímetro) e pode ser resultado de diversos factores, nomeadamente:

Quadro 10.3– Valores dos deslocamentos medidos pelos LVDT's em mm.

Caso de carga	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	LVDT 4	LVDT 5	LVDT 6	LVDT 7	LVDT 8	LVDT 9	LVDT 10
1	0.290	-0.205	-0.606	0.031	0.103	0.005	-0.024	-0.187	-0.203	0.130
2	0.204	-0.262	-0.926	0.045	0.114	0.058	-0.004	-0.188	-0.202	0.120
3	0.014	-0.201	-1.055	0.067	0.092	0.096	0.042	-0.116	-0.116	0.059
4	-0.782	-1.049	0.293	0.064	0.090	0.027	0.002	-0.875	-0.425	0.086
5	-1.456	-1.782	-2.205	0.102	0.045	-0.029	0.050	-0.990	-0.465	0.079
6	-0.899	-1.107	-1.916	0.057	0.081	0.027	0.013	-0.865	-0.380	0.064
7	-1.960	-2.371	-2.563	0.139	0.027	-0.059	0.087	-1.078	-0.519	0.082
8	-1.081	-1.275	-1.583	0.054	0.057	0.014	0.022	-0.892	-0.390	0.055
9	-1.070	-1.244	-1.704	0.038	0.051	0.007	0.025	-0.889	-0.380	0.049
10	-2.146	-2.497	-2.268	0.135	-0.005	-0.051	0.082	-1.081	-0.520	0.066
11	-1.237	-1.393	-1.519	0.057	0.045	0.019	0.022	-0.902	-0.391	0.046

— As operações de posicionamento do veículo sobre a BC e de saída, realizadas sempre pelo mesmo lado da plataforma rodoviária (do lado de Estremoz), estão associadas a importantes acções de arranque e de frenagem, constituindo sem dúvida uma acção horizontal não simétrica e relevante para a observação em causa; será provavelmente este o principal motivo pelo qual os resultados da observação apresentam alguma assimetria;

— Em cada um dos casos de carga 5, 7 e 10, o veículo pode não ter sido posicionado exactamente ao eixo da BC;

— Os LVDT's podem não ter sido instalados em simetria perfeita no interior da estrutura;

— O sistema de juntas tipo macho-fêmea da BC não é simétrico dado que num dos lados do “U” o macho está no elemento inferior e no outro lado está no elemento superior (ver Figura 10.7).

Na Figura 10.13 estão explicitados os resultados da observação correspondente aos LVDT's 1 a 3 que medem os deslocamentos relativos entre as faces interiores das travessas superior e inferior da BC (ver Figura 10.9). No decorrer do ensaio os LVDT's 1 e 2 apresentaram valores coerentes e muito semelhantes enquanto que o LVDT 3 revelou um comportamento de mais difícil interpretação. O comportamento menos razoável do LVDT 3 poderá estar associado a alguma deficiência na sua

instalação, nomeadamente devido a alguma singularidade do ponto da superfície da BC onde estavam a ser recolhidos os deslocamentos.

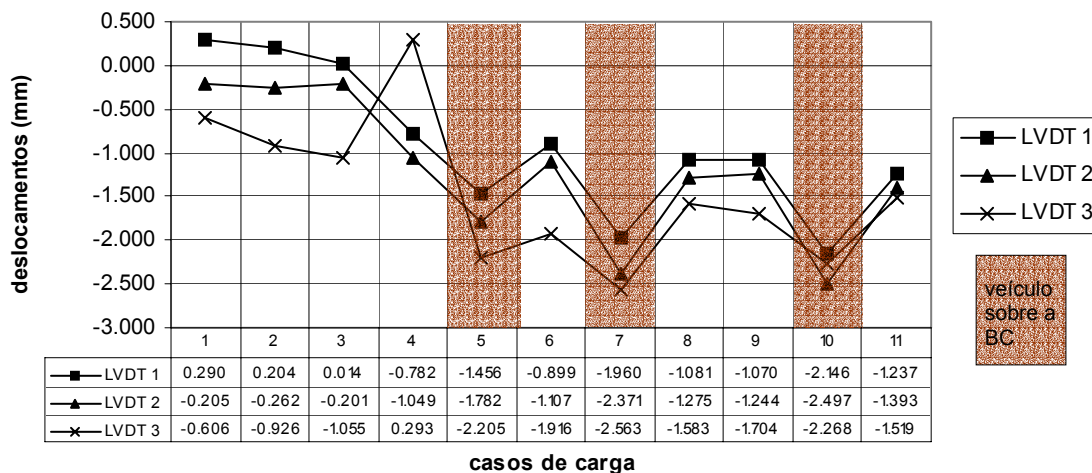


Figura 10.13 — Deslocamentos medidos pelos LVDT's 1 a 3 nas diversas situações de ensaio.

De um modo geral, para as situações de carregamento 5, 7 e 10 verifica-se que o LVDT 2, posicionado a meio vão da BC, apresenta um maior deslocamento do que os LVDT's 1 e 3. Naturalmente que o caso de carga 10, em que toda a carga do eixo traseiro do veículo está sobre o meio vão da BC é o que conduz a valores mais elevados de deslocamentos.

No caso de carga 9 (veículo ao lado mas no limite da área definida pela BC) os LVDT's não apresentam deslocamentos significativos quando comparados as restantes situações de carregamento.

Nos casos de carga sem o veículo sobre a BC (casos de carga 4, 6, 8 e 11) verifica-se que os LVDT's, e de um modo mais evidente o LVDT 1 e o LVDT 2, vão variando o valor das suas leituras em vazio (encurtando) com o decorrer do ensaio. Este facto poderá estar relacionado com a alteração dos valores dos impulsos nos montantes da BC devido às passagens sucessivas do veículo, conforme adiante se verá.

Na Figura 10.14 são apresentados os deslocamentos para os diversos casos de carga dos LVDT's 4 a 7, posicionados nos cantos superior e inferior da BC (ver Figura 10.9). Pode verificar-se que nos casos de carga em que o veículo está posicionado sobre a BC, os LVDT's posicionados nos cantos inferiores (LVDT 4 e LVDT 7) alongam, demonstrando uma maior deformação dos montantes em relação à travessa inferior (ver Figura 10.15). Por outro lado, os LVDT's posicionados nos cantos superiores encurtam devido à maior deformação da travessa superior quando comparada com a dos montantes.

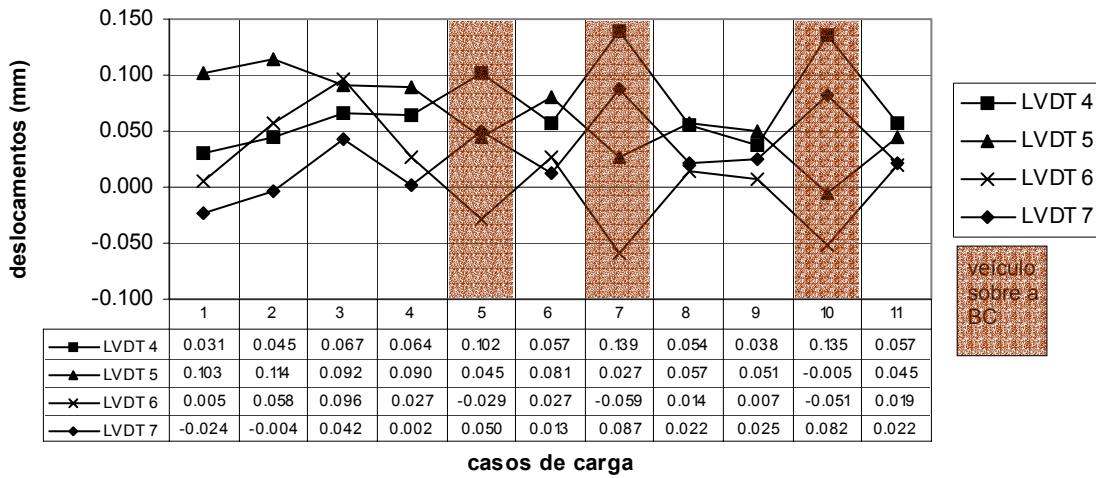


Figura 10.14 — Deslocamentos medidos pelos LVDT's 4 a 7 nas diversas situações de ensaio.

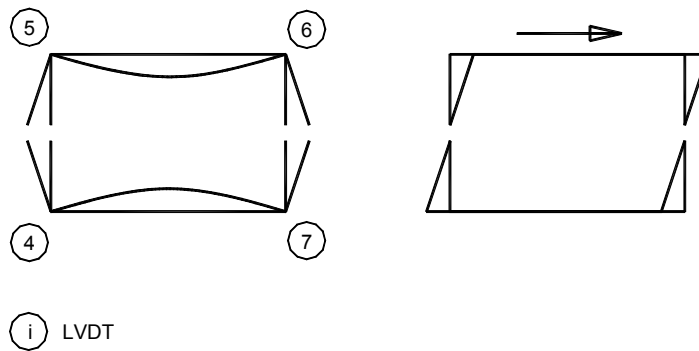


Figura 10.15 — Modos de deformação da Box-Culvert.

Verifica-se também que o LVDT 6 encurta mais do que o LVDT 5 e que o LVDT 7 alonga mais do que o LVDT 4. Este comportamento denuncia uma certa distorção do módulo instrumentado (ver Figura 10.16), devido provavelmente à acções horizontais de arranque e de frenagem do veículo sobre a BC, conforme exposto anteriormente.

A Figura 10.16 apresenta os resultados dos deslocamentos medidos pelos LVDT's 8 e 9, dispostos na zona da junta dos dois "U's" da BC. Para um mesmo caso de carga, os deslocamentos experimentados pelo LVDT 8 são ligeiramente superiores aos do LVDT 9, denunciando o já referido comportamento não simétrico da estrutura. Nas fases que se sucedem à acção do veículo, casos de carga sem o veículo (casos de carga 6, 8 e 11), a recuperação das deformações é praticamente integral, ou seja, estas deformações não são devidas ao ajuste das juntas mas sim à rotação dos

montantes nesta zona. Verifica-se que o ajuste das juntas foi feito na sua quase totalidade até ao caso de carga 4 que coincide com o final da construção.

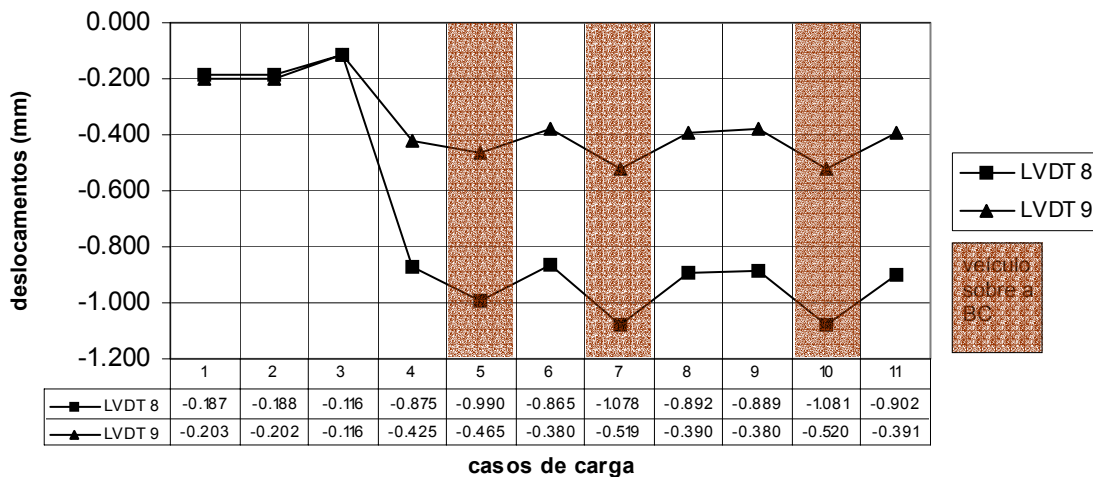


Figura 10.16 — Deslocamentos medidos pelos LVDT's 8 e 9 nas diversas situações de ensaio.

A Figura 10.17 apresenta os deslocamentos para os diversos casos de carga medidos pelo LVDT 10, posicionado sob a travessa superior, aproximadamente a meio vão (ver Figura 10.9). Verifica-se que a acção do veículo sobre a BC provoca o alongamento do LVDT10, demonstrando a distensão das fibras inferiores da travessa superior da BC.

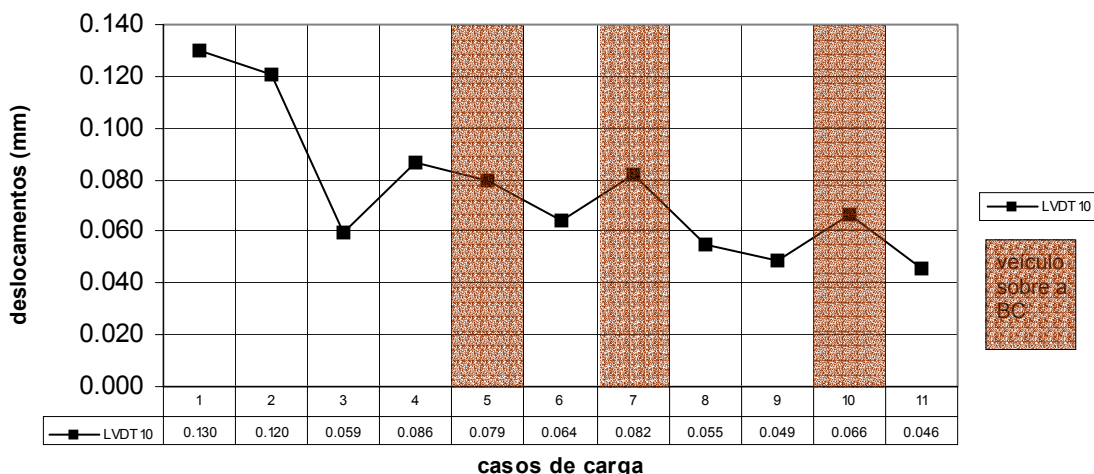


Figura 10.17 — Deslocamentos medidos pelo LVDT 10 nas diversas situações de ensaio.

Comparando os resultados antes e após a acção do veículo sobre a BC verifica-se que o valor do deslocamento que o LVDT 10 apresenta após a saída do veículo é inferior ao valor do deslocamento que este apresenta na fase anterior. Este facto pode resultar da alteração das acções de impulsos nos montantes a que a BC está sujeita, devido às passagens sucessivas do veículo sobre o material de aterro envolvente, responsáveis por esforços de flexão negativos na travessa superior.

A partir dos resultados obtidos no LVDT 10 podemos avaliar a extensão máxima do betão na face inferior que é muito pequena, podendo concluir-se que o processo de fendilhação não foi iniciado com o carregamento efectuado.

Refira-se finalmente que devido à dimensão da estrutura e ao valor das acções que lhe estão aplicadas os valores dos deslocamentos medidos são muito pequenos.

São os LVDT's 1 a 3 que apresentam uma maior amplitude de deslocamentos no decorrer de todo o ensaio, da ordem dos 3 mm, valor este muito superior aos verificados nos restantes LVDT's. Compare-se, por exemplo, esta amplitude de deslocamentos com a variação máxima entre o final da construção (caso de carga 4) e o último caso de carga (caso de carga 11), de 0,206 mm do LVDT 8 (ver Figura 10.16) ou com 0,04 mm do LVDT 10 (ver Figura 10.17).

Não obstante a precisão do equipamento utilizado, naturalmente que para esta gama de valores, não deverão ser desprezados os erros associados à sua instalação e ao processo de medição.

10.2.7 Conclusões

Foi efectuada a monitorização e observação do comportamento de um módulo de uma passagem hidráulica, constituída por box-culvert, durante a fase construtiva e ensaio de carga subsequente. No exemplo analisado, a altura de aterro é mínima pelo que o efeito da acção do rodado do veículo é máximo.

Em termos gerais pode concluir-se que o comportamento observado para as acções instaladas corresponde a um comportamento elástico e 'saudável' da estrutura de betão armado, o que foi validado pela análise estrutural simplificada.

Como já era previsível o solo envolvente da estrutura box-culvert tem uma influência muito significativa sobre o seu comportamento. As condições de compactação e de comportamento para cargas repetidas do solo que serve de base à estrutura e do solo lateral poderá ter uma influência decisiva sobre os esforços instalados a longo prazo e sobre a durabilidade da estrutura.

10.3 MONITORIZAÇÃO DE UMA BOX-CULVERT DURANTE A CONSTRUÇÃO

10.3.1 Introdução

O forte crescimento do sector de obras públicas, resultado do desenvolvimento continuado da rede viária e de um conjunto significativo de outras obras, associadas a importantes eventos e à reabilitação do tecido urbano, tem conduzido à necessidade de construção em larga escala, e exigido um esforço significativo à indústria de construção. É neste contexto nacional, que as estruturas pré-fabricadas têm assumido uma relevância crescente, de que as Box-Culvert (BC) são um caso particular.

O comportamento mecânico das estruturas enterradas, caracteriza-se por uma elevada interacção solo/estrutura. Se os esforços aplicados à estrutura dependem em grande medida dos impulsos do solo envolvente, também estas pressões estão fortemente dependentes da deformação da estrutura, resultante dessa mesma pressão. Acresce que, a distribuição das pressões aplicadas à estrutura dependem, além das características geotécnicas do material de aterro, e das condições de execução, da relação entre a rigidez da estrutura e a deformabilidade do solo.

Uma análise detalhada deste tipo de estrutura foi realizada com um modelo numérico que tem por base o método dos elementos finitos, e que integra elementos de interface para simular a descontinuidade solo/betão, tendo ainda em conta o processo construtivo (Sang, 2000). Este estudo permitiu estimar esta dependência, tendo sido propostos alguns diagramas simplificados para a verificação da segurança, para estruturas enterradas de diversas dimensões.

O caso de obra que a seguir se descreve é a Passagem Hidráulica PH0.2, localizada na A2 — Auto-Estrada do Sul, Sublanço Almodôvar / S. Bartolomeu de Messines, ao km 0+838,000. São utilizados elementos pré-fabricados da Maprel da série L100, com secção transversal interior de 2,00m×2,00m, e exterior de 2,32m×2,50m e comprimento unitário de 2,50m. Longitudinalmente a obra apresenta o desenvolvimento total de 125,0m, cruzando o seu eixo com o da auto-estrada (AE) com um viés de 43,00g. A altura total de aterro sobre a box-culvert, que varia com a inclinação longitudinal da passagem hidráulica (PH) e das sobreelevações da plataforma da AE, apresenta valores máximos próximos de 10,6m.

Foi instrumentada uma secção transversal da BC sob a plataforma da AE, com altura de aterro próxima do seu valor máximo, medindo-se em diversos pontos dessa secção, as deformações no betão e as pressões impostas pelo material de aterro. A aquisição de sinal dos sensores instalados teve início aquando da instalação dos elementos pré-fabricados, antes portanto da colocação do material de aterro. A localização da secção instrumentada sob a plataforma da faixa de rodagem da

AE permitirá, num ensaio de carga estático, obter algumas conclusões sobre eventuais efeitos da acção sobre a estrutura. A permanência no local de um posto de observação, com funcionamento autónomo, viabiliza a observação do comportamento da estrutura a longo prazo. A Figura 10.18 apresenta uma vista geral do local da obra, após a instalação dos elementos pré-fabricados e da execução do aterro até à altura da laje superior.



Figura 10.18 — Vista geral do local da obra.

Ao aplicar um sistema de monitorização a uma BC pretende-se contribuir para o conhecimento do comportamento a curto e a longo prazo de estruturas enterradas, procurando tirar conclusões sobre a segurança estrutural, quando são adoptados os actuais processos simplificados de cálculo. Este exemplo será explorado no Capítulo 11 onde se exemplifica as potencialidades dos sistemas de monitorização na interpretação do comportamento estrutural.

10.3.2 Descrição da secção instrumentada

A secção instrumentada compreende a um elemento superior e um elemento inferior de um módulo, pré-fabricado de betão armado, fornecido pela empresa Maprel, da série L100, cujas características geométricas estão representadas na Figura 10.19. O elemento superior é constituído por uma laje superior, também designada por travessa, com 2,32m de largura e 0,25m de espessura. Os montantes de 1,25m de altura têm espessura variável, entre 0,16m junto à travessa e 0,15m no encaixe. O encaixe entre os dois elementos pré-fabricados em obra é feito através de um sistema macho-fêmea. Longitudinalmente têm 2,50m de comprimento. A Figura 10.20 apresenta a vista de topo de uma das extremidades da PH, durante a fase de instalação em obra.

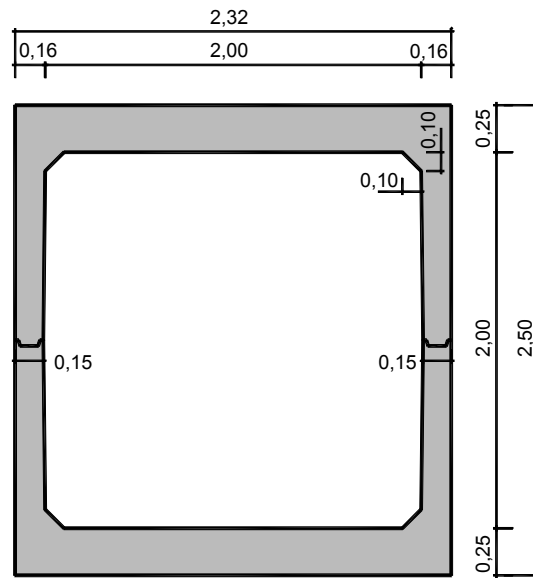


Figura 10.19 — Dimensões da secção transversal da box-culvert.



Figura 10.20 — Elementos instalados em obra.

10.3.3 Instalação dos extensómetros de embeber no betão

No que diz respeito à medição das extensões do betão, e após uma breve análise dos pontos considerados críticos na secção, optou-se por instalar dez extensómetros de resistência eléctrica de embeber no interior do betão, no elemento superior da BC, em três pontos da travessa e num ponto

de cada um dos montantes, junto às faces exterior e interior. Na Figura 10.21 representa-se esquematicamente, a localização adoptada para os extensómetros, numerados de SG1 a SG10. Os extensómetros utilizados são de embeber no interior do betão, fabricados pela Measurements Group, da série EGP-5-350, já descritos anteriormente.

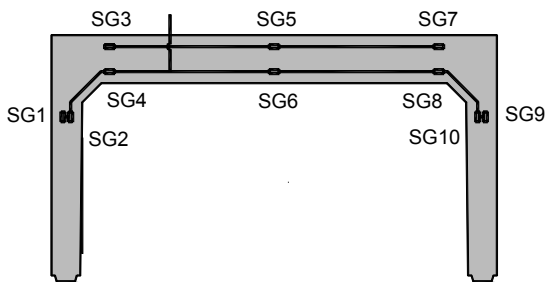


Figura 10.21 — Posicionamento dos extensómetros na secção.



Figura 10.22 — Armadura do elemento a instrumentar.

A instalação dos extensómetros no interior do betão destes elementos pré-fabricados, conduziu a que a primeira intervenção na estrutura tivesse ocorrido antes da betonagem, na fábrica da Maprel, em Rio Maior. Uma vez seleccionado o elemento pré-fabricado a monitorizar, o processo de fabrico que este seguiu foi semelhante ao dos restantes elementos do mesmo modelo a empregar em obra. A única diferença na linha de fabrico consistiu na instalação dos extensómetros, que antecedeu a fase de betonagem.



Figura 10.23 — Posicionamento do extensómetro SG1 e registo do seu posicionamento.

Após a montagem da armadura, conforme o projecto de execução, esta foi colocada em local reservado (ver Figura 10.22), onde foi possível, com todas as condições, proceder à instalação dos extensómetros. Estes foram devidamente atados aos varões, identificados, e foi determinado e registado o seu posicionamento, medido em relação aos limites das armaduras. A Figura 10.23 e Figura 10.24 ilustram o processo de posicionamento de alguns dos extensómetros.



a) Extensómetros SG3 e SG4.



b) Extensómetros SG5 e SG6.

Figura 10.24 — Pormenores de extensómetros instalados.

Instalados os extensómetros, a armadura foi cuidadosamente posicionada no interior do molde respectivo (ver Figura 10.25) após o que se fez uma primeira verificação acerca da integridade dos sensores, medindo-se o respectivo valor da resistência. Na zona de saída dos cabos foi deixado um negativo, por forma a que os cabos, que durante a fase de betonagem terão de sair forçosamente pela face exterior da BC, depois da desmoldagem, possam passar para o seu interior.



Figura 10.25 — Colocação da armadura no interior do molde.

A betonagem da peça foi processada sem qualquer cuidado especial, excepto no que diz respeito à deposição do betão no molde. Com o objectivo garantir a integridade dos extensómetros após a betonagem, foi solicitado que, na deposição do betão no molde, fossem evitadas as zonas por eles ocupadas. A vibrocompactação do betão é realizada com recurso a vibradores aplicados ao próprio molde, não tendo sido por isso imposto qualquer condicionamento à sua prossecução. A Figura 10.26 ilustra a betonagem do elemento devidamente instrumentado, durante a deposição do betão no molde e após a vibrocompactação.



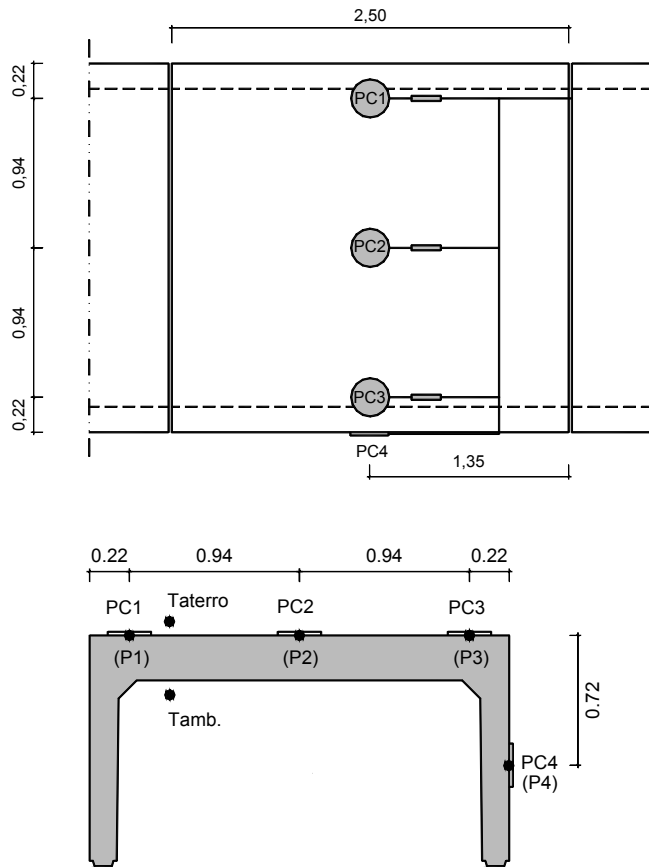
Figura 10.26 — Box-Culvert durante e após a betonagem.

10.3.4 Instalação das células de pressão

A medição das pressões do solo envolvente sobre a estrutura enterrada foi feita com recurso a células de pressão de corda vibrante, produzidas pela Soil Instruments Limited, modelo 6P1.23, com gama de medida entre 0 e 500kPa.

Estudos efectuados anteriormente (Sang, 2000), permitiram concluir que seria definidor da distribuição da pressão no contorno da BC, a medição da pressão vertical em três pontos sobre a travessa, nomeadamente, a meio vão e sobre os montantes, e a medição da pressão horizontal nos montantes. Condicionamentos de vária ordem conduziram a que nos montantes apenas tenha sido disposta uma célula de pressão, aproximadamente a meia altura do montante do módulo superior da BC.

Na Figura 10.27 apresenta-se o esquema elaborado para o correcto posicionamento em obra das células de pressão, designadas por PC1 a PC4, cotando-se o centro de gravidade de cada disco sensor, representados pelos pontos P1 a P4. Ilustra-se ainda o aspecto geral das quatro células de pressão após a instalação.



a) Esquema de localização;

b) Células de pressão após a instalação.

Figura 10.27 — Posicionamento das células de pressão sobre a BC.

À data de instalação das células de pressão em obra, já tinha sido executado uma parte importante do aterro, até uma altura muito próxima da travessa da BC (ver Figura 10.28). Para a instalação da PC4 foi necessário escavar cerca de 50cm de profundidade, para que esta fosse correctamente posicionada (ver Figura 10.27b)). Foram tomadas todas as medidas possíveis no sentido de minimizar esta singularidade introduzida no aterro executado, nomeadamente foram melhoradas as condições locais de compactação através da utilização de material de aterro seleccionado.

A superfície onde foram instaladas as três células de pressão sobre a travessa da BC (PC1 a PC3), é uma superfície livre de betonagem, e por isso pouco regular. A regularização desta superfície foi feita previamente, antes da instalação das células respectivas, com uma argamassa de cimento muito fina, garantindo-se assim o apoio integral do disco sensor.



Figura 10.28 — Vista geral do local da obra e do acesso ao interior.

Conforme descrito anteriormente, o sensor de pressão de corda vibrante está instalado a uma certa distância do disco sensor, e ligado a este através de um tubo de aço de pequeno diâmetro. Este tubo e o próprio sensor de corda vibrante foram considerados elementos frágeis do instrumento de medida. Foi, por isso, adoptado um dispositivo de protecção a estes elementos, protegendo-os não só das elevadas pressões que de outro modo sobre eles seriam exercidas a longo prazo pelo material de aterro, mas também para prevenir eventuais danos durante a colocação das primeiras camadas de aterro. Este dispositivo de protecção, especialmente executado para o efeito, está ilustrado na Figura 10.29. É constituído por meio tubo de 100mm de diâmetro e cerca de 600mm de comprimento, dotado de quatro elementos de fixação, devidamente furados, para ligação aparafusada ao BC. Este dispositivo de protecção permite envolver a totalidade do sensor de corda vibrante, a saída do cabo eléctrico e ainda parte do tubo de ligação ao disco sensor. Foram instalados a uma certa distância do disco sensor (entre 6cm e 7cm) para que não possa constituir uma singularidade no valor da pressão exercida sobre o disco sensor.

Uma vez instaladas as células de pressão, sobre a secção instrumentada da BC, foi colocada uma primeira camada de material seleccionado de aterro (ver Figura 10.30). Sucederam-se então as fases de colocação de material de aterro e de compactação, por camadas, processada de modo idêntico em toda a zona de aterro.



Figura 10.29 — Protecção mecânica do sensor de pressão.



Figura 10.30 — Camada de aterro colocada sobre as células de pressão.

10.3.5 Sistema de monitorização adoptado

O sistema de monitorização adoptado para esta estrutura está esquematicamente representado na Figura 10.31. Conforme anteriormente exposto, foram instalados dez extensómetros de embeber no betão (SG1 a SG10), no elemento superior da série L100, produzido pela Maprel. Estes elementos têm 2,50m de comprimento. Os extensómetros foram posicionados na secção média, ou seja, a 1,25m das extremidades. As células de pressão foram desviadas 10cm desta secção para evitar que

as operações de fixação com parafusos pudessem, de algum modo, atingir os extensómetros ou os cabos, situados mais próximo da superfície.

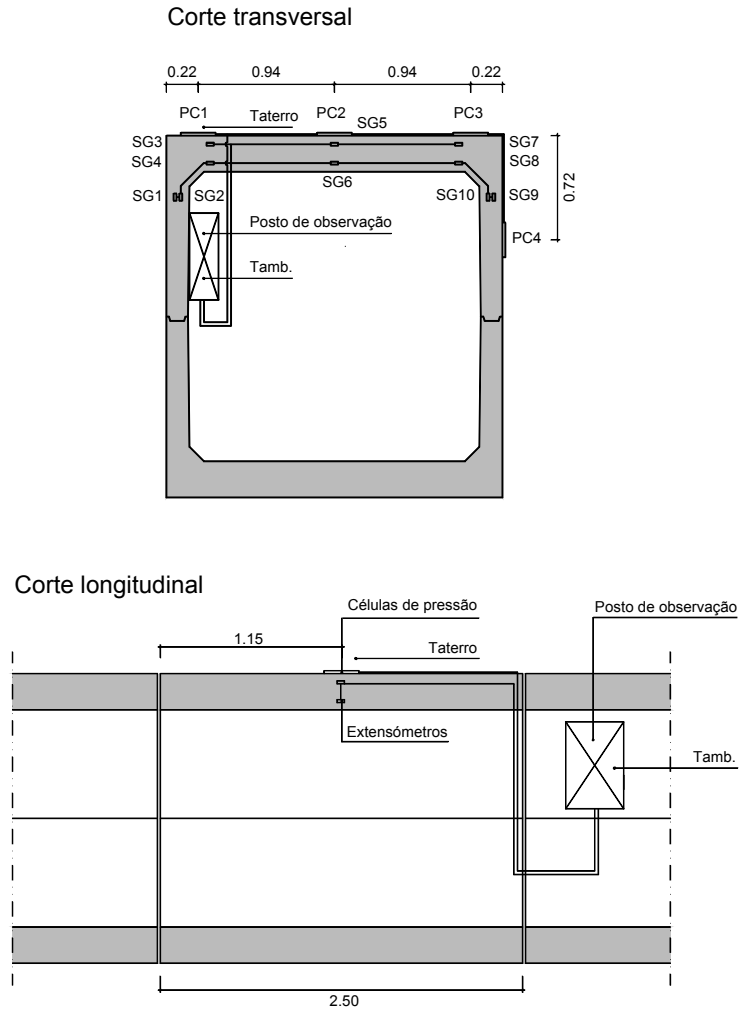


Figura 10.31 — Esquema de montagem do sistema de monitorização.

Os cabos de ligação dos extensómetros, embebidos no interior do betão até à extremidade do elemento instrumentado, são conduzidos a partir daí pelo interior da BC, juntamente com os cabos de ligação das células de pressão, até ao Posto de Observação.

Foram instalados dois sensores de temperatura, para eventuais correcções quer às medições realizadas com os extensómetros, quer às das células de pressão. Um deles foi instalado junto à célula de pressão PC1 (T_{aterro}), medindo a temperatura do aterro, e o outro no interior do posto de observação ($T_{amb.}$), medindo assim a temperatura ambiente no interior da BC. Os sensores instalados têm por base o LM35, já descrito anteriormente. Conforme adiante será referido, a variação de

temperatura medida não justifica correcções aos instrumentos de medição. Estes sensores serviram contudo para demonstrar a forte dependência da pressão do aterro com a temperatura.

Não foi feita monitorização local para a obtenção das extensões do betão devidas aos efeitos da retracção e da fluência. A retracção ocorrida no período compreendido entre a instalação em obra do Posto de Observação e o início dos trabalhos de aterro, teve oportunidade de ser medida, através da aquisição de sinal proveniente dos extensómetros. Durante esta fase, que neste caso foi de cerca de três meses, os elementos pré-fabricados não estão sujeitos a nenhuma outra acção além do seu peso próprio e da variação de temperatura. Contudo, devido a um incidente ocorrido em obra, provavelmente durante uma operação de impermeabilização das juntas da BC existentes nas proximidades do Posto de Observação, as ligações dos extensómetros foram interrompidas logo ao fim dos primeiros dias de leitura. Este facto só foi detectado na visita seguinte ao local da obra, aquando da instalação das células de pressão, já a operação de aterro tinha sido iniciada, e por isso, a fase de carregamento da estrutura.



Figura 10.32 — Posto de observação instalado no interior da box-culvert.

O Posto de Observação, representado na Figura 10.32, foi dotado de um sistema de aquisição e armazenamento de sinal da Data Electronics, Ltd, modelo DT515, especialmente vocacionado para a medição de sensores de corda vibrante. A alimentação é assegurada por uma bateria de 12V e de 33Ah. Devido ao local da obra, e na ausência de rede telefónica, quer fixa quer móvel, não foi possível instalar um sistema de controlo remoto do posto de observação. Este facto, aliado à

distância ao local da obra, constituiu um importante óbice ao controlo continuado do avanço dos trabalhos, e dos seus efeitos na estrutura.

Foram realizadas medições diárias, com intervalo entre leituras de 3 horas, de todos os sensores instalados, nomeadamente, os dez extensómetros, as quatro células de pressão e os dois sensores de temperatura. Foi feito um registo diário da cota do aterro, que foi entretanto sendo colocado sobre a secção instrumentada, com recurso a meios topográficos. Foram ainda fornecidos pela empresa construtora, as características geotécnicas do material de aterro e os resultados das medições in situ para a determinação da sua baridade e humidade.

10.3.6 Resultados obtidos

Durante a fase de colocação de material de aterro sobre a box-culvert, foram feitas medições da cota de um ponto sobre a secção instrumentada, com base na topografia local, o que permitiu observar a evolução da sua altura. A Figura 10.33 apresenta essa evolução, fornecida pelo topógrafo que diariamente se deslocou à obra. De acordo com os valores apresentados, a fase de aterro decorreu entre os dias 13 e 21 de Fevereiro. Ao fim de aproximadamente um mês e meio, foi feita nova medição, tendo-se então verificado uma diminuição da cota desse ponto de 20cm, devido, provavelmente, a assentamentos do terrapleno.

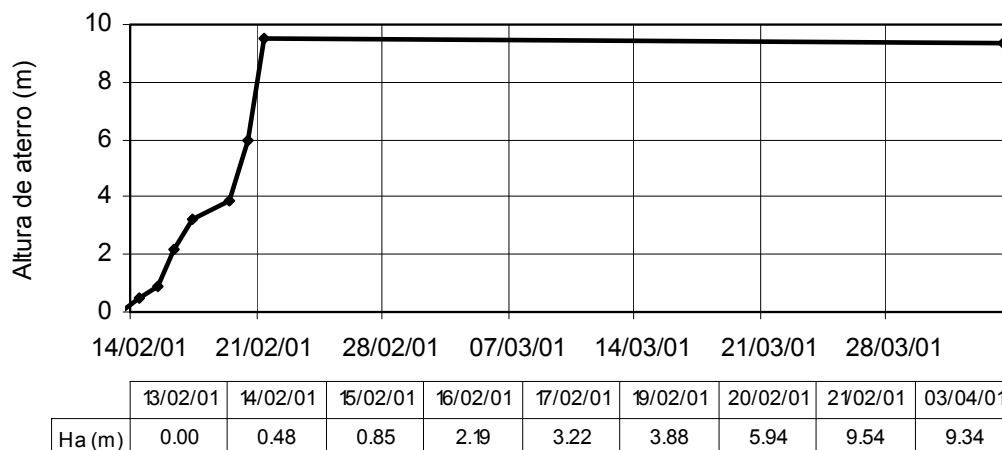


Figura 10.33 — Evolução da altura de aterro sobre a secção instrumentada da box-culvert.

A evolução no tempo dos valores medidos nas células de pressão está representada na Figura 10.34. Os valores indicados foram recolhidos diariamente, às 6:00 da manhã. As células PC1, PC2 e PC3 medem a pressão vertical sobre a travessa da BC. A célula PC4 mede a pressão horizontal sobre um dos montantes (ver Figura 10.31). De acordo com os valores lidos nas células PC1 e PC3, posicionadas sobre os montantes, é nesta zona que se desenvolvem as máximas pressões verticais.

Na zona de meio vão da travessa, onde está posicionada a célula PC2, o valor medido da pressão é sistematicamente inferior ao medido na zona dos montantes (células PC1 e PC3). Esta diferença, praticamente imperceptível durante a fase de aterro, cresce com a altura de aterro, sendo máxima após a sua conclusão. Nesta fase, a célula PC2 mede valores cerca de 45% dos medidos pelas células PC1 e PC3, tendo-se mantido, até à data, aproximadamente constante.

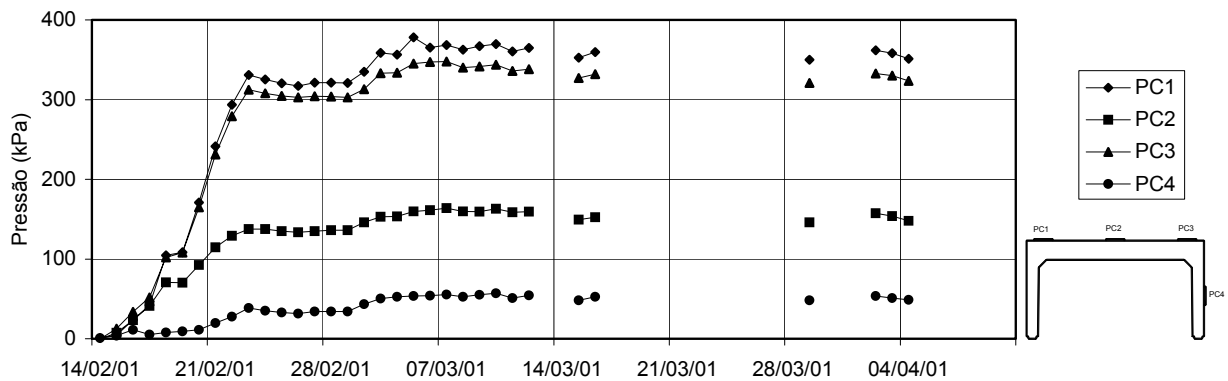


Figura 10.34 — Valores lidos nas células de pressão.

É interessante comparar os valores das pressões verticais medidos nas células PC1 a PC3, com o produto da altura do aterro colocado (H_a) pelo seu peso específico (γ). No final do aterro, a partir de ensaios realizados no local para a determinação da baridade, esta pressão ($H_a \times \gamma$) foi estimada em, aproximadamente, 210kPa. Valor este superior ao medido na célula PC2, mas bastante inferior ao medido nas células PC1 e PC3. Em particular, o valor medido pela célula PC2 está compreendido entre 0,7 e 0,8 daquela pressão ($H_a \times \gamma$), enquanto que os valores medidos nas células PC1 e PC3 estão entre 1,6 e 1,7.

Os valores ligeiramente inferiores medidos pela célula PC3, quando comparados com a célula PC1, podem ser resultado da sua proximidade com a célula PC4. Conforme descrito anteriormente, para a instalação desta última, houve necessidade de escavar o aterro entretanto executado. Esta singularidade no aterro pode ter afectado o grau de compactação em toda a zona envolvente, na qual a célula PC3 está incluída. Outra causa para esta diferença de valores de pressão pode ser o empenamento do módulo instrumentado devido, provavelmente, a assentamento diferenciais do solo de fundação. O empenamento do módulo é evidenciado através da fendilhação diagonal observada no tecto da BC.

Não obstante a topografia ter indicado que a cota máxima, que correspondeu ao final desta fase de aterro, ocorreu no dia 21 de Fevereiro, os valores lidos nas células de pressão continuaram a aumentar significativamente, tendo-se registado o valor máximo de 340kPa na célula PC1 às 21:00 horas do dia 22. Posteriormente, a partir do dia 3 de Março, verificou-se um novo aumento do valor

da pressão exercida pelo aterro sobre a estrutura, acusado em todas as células, mas desta vez com uma variação muito ligeira. Conforme adiante será realçado este comportamento pode estar associado a efeitos térmicos mas também ao adensamento do material de aterro, em resultado da passagem no local de camiões carregados de solo, e às fortes chuvadas que entretanto se fizeram sentir.

As medições realizadas com os extensómetros instalados a meio vão da travessa, estão representadas na Figura 10.35. O extensómetro SG5 está localizado junto à face superior enquanto o SG6 está junto à face inferior. Os valores apresentados dizem respeito à variação da extensão medida desde a fase de início de colocação do material de aterro sobre a BC. Verifica-se um importante alongamento das fibras inferiores nesta zona da laje, que atinge valores próximos de $400\mu\epsilon$ ($0,4\%$), denunciado também pelo início da fendilhação entretanto observada no local. Os valores medidos das extensões indiciam uma importante deformação da travessa, que foi aumentando com o aumento da pressão vertical medida.

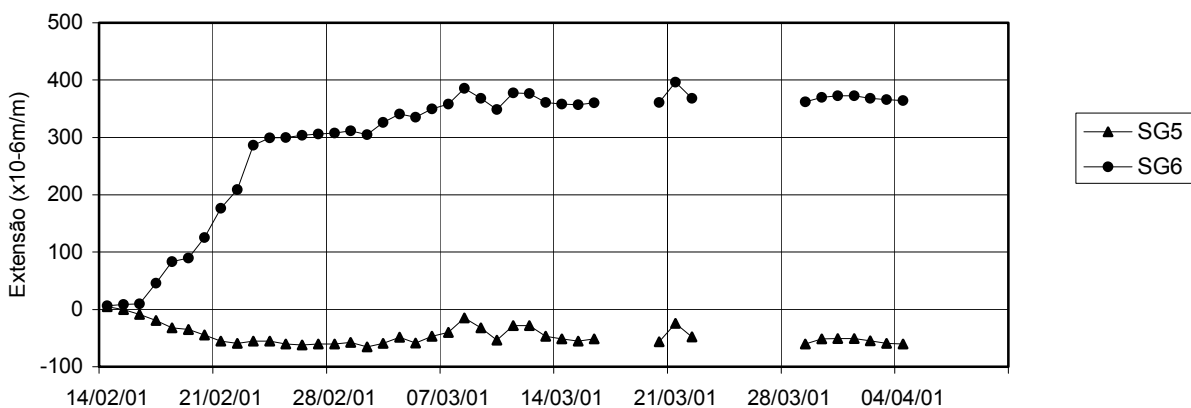


Figura 10.35 — Valores lidos nos extensómetros a meio vão da travessa.

Juntamente com o atrito desenvolvido na interface solo/montante, a deformação da travessa da BC, constitui um importante factor que contribui para a redistribuição da pressão vertical do solo sobre a BC (Sang, 2000). Esta diminui significativamente na zona mais flexível da estrutura, aumentando na zona mais rígida. Estes resultados estão de acordo com as diferenças encontradas entre os valores medidos nas células PC1 e PC3, posicionadas na zona mais rígida da estrutura, e na célula PC2, instalada a meio vão da travessa.

Na Figura 10.36 representam-se os valores diários, medidos às 6:00 horas, nos extensómetros posicionados horizontalmente, junto às faces superior e inferior da travessa da BC, nas proximidades dos montantes (ver Figura 10.31).

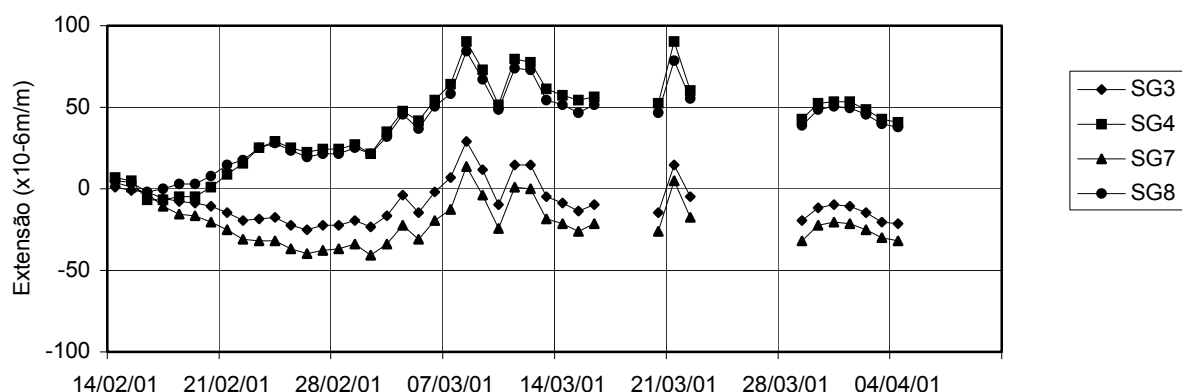


Figura 10.36 — Valores lidos nos extensómetros da travessa, junto aos montantes.

Os extensómetros SG3, SG4, SG7 e SG8 estão instalados nas extremidades da travessa distando o seu ponto médio 40cm da face lateral exterior respectiva. De acordo com os valores medidos nos extensómetros SG4 e SG8, nesta zona da travessa, ainda se fazem sentir alongamentos nas fibras inferiores. Os resultados das leituras nos extensómetros SG3 e SG7, permitem concluir que as fibras superiores estão, em geral, comprimidas.

Na Figura 10.37 representam-se os valores diários, medidos às 6:00 horas, nos extensómetros posicionados verticalmente junto às faces exterior e interior dos montantes da BC, nas proximidades da travessa (ver Figura 10.31). Verifica-se que, nesta zona dos montantes as fibras do lado interior da BC estão sempre comprimidas enquanto as da face oposta apresentam alongamentos, ainda que de valor não muito elevado.

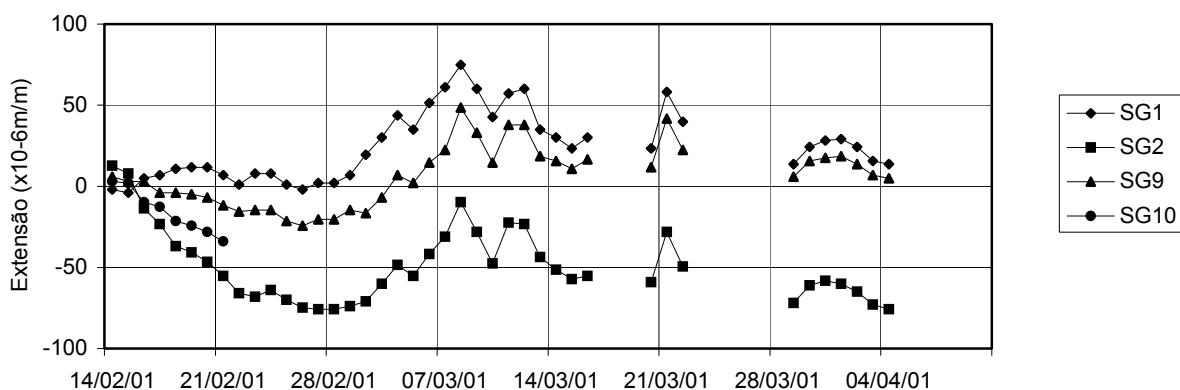


Figura 10.37 — Valores lidos nos extensómetros dos montantes.

O ponto médio dos extensómetros SG1 e SG2 está situado 34cm abaixo da face superior da BC enquanto que os extensómetros SG9 e SG10 foram instalados a 38cm. Esta diferença de posicionamento de 4cm, ainda que muito ligeira, dada o elevado gradiente de esforços que se deve verificar nesta zona da estrutura, pode justificar o facto de os primeiros, por estarem mais próximos do nó, exibirem os valores mais elevados de alongamentos e de encurtamentos.

A evolução diária das temperaturas, com leituras realizadas às 6:00 horas, está representada na Figura 10.38. São apresentados os resultados das medições feitas com os dois sensores de temperatura. Um deles, designado T_{aterro} , está situado no exterior da BC, junto às células de pressão. O outro, designado $T_{amb.}$, está instalado junto ao Posto de Observação, medindo por isso a temperatura ambiente que se faz sentir no interior da BC.

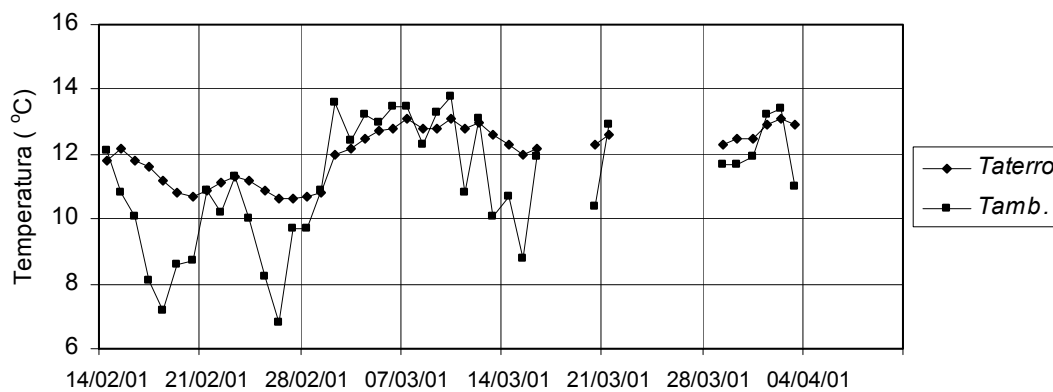


Figura 10.38 — Evolução diária das temperaturas às 6:00 horas.

Naturalmente que a temperatura registada em pleno aterro é muito estável tendo-se confirmado essa mesma estabilidade mesmo ao longo do dia. A Figura 10.39 ilustra a variação diária da temperatura com intervalo entre leituras de 3 horas. O acentuado arrefecimento nocturno que no período em referência se fez sentir na zona, está bem patente nas baixas temperaturas registadas pelo sensor instalado no interior da BC.

Estes valores permitem observar a temperatura diferencial a que a BC está sujeita. A diferença entre as temperaturas registadas junto às faces exterior e interior, na generalidade dos dias, não excedeu os 3°C.

Dadas as reduzidas variações de temperatura no período em referência concluiu-se não ser necessário proceder às correspondentes correcções dos valores medidos, em particular no que diz respeito aos valores obtidos a partir das células de pressão de corda vibrante.

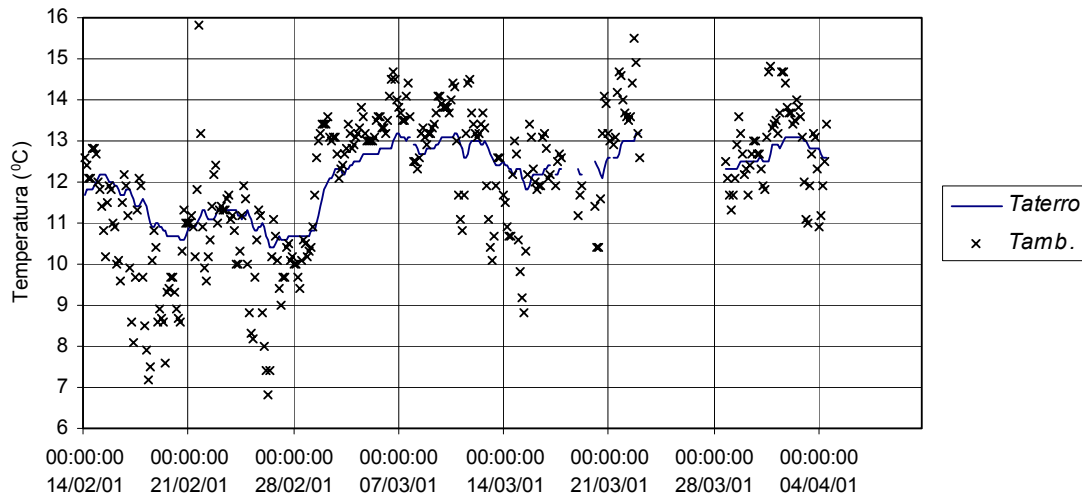


Figura 10.39 — Evolução diária da temperatura.

10.3.7 Considerações finais

Do ponto de vista da monitorização estrutural a intervenção na estrutura desenvolveu-se em duas fases. Numa primeira fase procedeu-se à instalação dos sensores e do Posto de Observação — os extensómetros foram instalados na fábrica de pré-fabricação e as células de pressão e os sensores de temperatura no local da obra. Na fase seguinte procedeu-se a deslocações sucessivas ao local da obra para recolha das medições armazenadas em memória, verificação do estado da bateria, inspecção visual da estrutura e confirmação das restantes condições da obra, como por exemplo, no que diz respeito às alturas de aterro medidas.

As principais dificuldades encontradas resultaram, por um lado, da distância e dos acessos ao local da obra, por outro das condições climatéricas, que tornaram difícil uma programação atempada de cada uma das intervenções. De facto, o Inverno rigoroso que se fez sentir conduziu a que fosse praticamente imprevisível a data do avanço do aterro assim como o tempo que este demoraria a ser executado. Nestas condições não foi possível, por exemplo, o acompanhamento no local da colocação das primeiras camadas de aterro, inviabilizando eventuais mediadas correctivas ao sistema de monitorização delineado.

Acresce o facto de, no local da obra, não ter sido possível implementar um sistema de controlo remoto do Posto de Observação via telefone, nem através da rede fixa nem da rede móvel. Daí que, para a obtenção das leituras efectuadas, houvesse sempre necessidade de deslocação ao local da obra.

Os resultados da medição efectuada nesta BC, sumariamente referidos neste capítulo, são actualizados e explanados no capítulo seguinte servindo de base a uma análise do comportamento deste tipo de estruturas.

10.4 PROJECTO DE MONITORIZAÇÃO DA PONTE INFANTE D. HENRIQUE

10.4.1 Introdução

A Ponte Infante D. Henrique sobre o Rio Douro, no Porto, ligará a zona das Fontainhas, na margem direita, à Serra do Pilar, na margem esquerda, com um desenvolvimento total de 371,0m entre encontros. Apresenta-se como uma estrutura muito esbelta, apoiada directamente nas encostas, com funcionamento conjunto de dois elementos fundamentais: um tabuleiro, de rigidez apreciável e uma poligonal, comparativamente mais flexível, que o suporta. A poligonal permite vencer um vão entre eixos de apoio de 280m, com uma flecha entre as nascenças e o fecho de 25,0m. Na Figura 10.40 é apresentada uma antevisão do que será esta futura ponte (Fonseca et al. (a), 2000).



Figura 10.40 — Perspectiva da futura Ponte Infante D. Henrique, no Porto.

O tabuleiro, de betão armado pré-esforçado, com largura total de 20,0m, é constituído por uma secção em caixão monocelular, com 11,0m de largura, que se prolonga para um e outro lado em consola, com 4,5m de vão livre. A altura da secção de 4,50m é praticamente constante em toda a obra, excepto nos 70,0m centrais, em que o tabuleiro se funde com a poligonal que o suporta, apresentando então a altura total de 6,0m.

O apoio do tabuleiro sobre a poligonal é directo nos 70,0m centrais, enquanto que, na zona restante, é conseguido através de seis montantes de betão armado, designados M1 a M6, três de cada um dos lados do fecho, com 1,20m de espessura, distanciados entre si de 35,0m. Os pontos de apoio dos montantes correspondem aos vértices da poligonal. Do lado de Gaia, o tabuleiro é ainda apoiado no pilar P1, de geometria muito idêntica à dos montantes.

A poligonal, de betão armado, tem 1,50m de espessura e uma largura que varia entre cerca de 20,0m junto às nascenças e 10,0m na zona de ligação ao tabuleiro. É aligeirada entre montantes, com tubos de 0,90m de diâmetro, afastados entre si de 1,40m.

Para serem utilizados durante o processo construtivo (Fonseca et al. (b), 2000), projectaram-se um conjunto de elementos estruturais provisórios, de que são exemplo os pilares provisórios PP1 e PP2, junto de cada uma das margens do rio, um conjunto de escoras de fundação E1 a E3, um sistema de ancoragens ao maciço de fundação, e um conjunto de cabos de retenção e de suspensão.

Os pilares provisórios PP1 e PP2 são aligeirados de betão armado, com secção transversal exterior de 6,0m×2,0m, e paredes de 0,45m de espessura.

Tendo por base um documento elaborado pela equipa projectista (AFA e IDEAM, 1999), foi delineada a intervenção do Laboratório de Estruturas (LE) do Departamento de Engenharia Civil (DECivil) da FEUP. Esta proposta de intervenção inclui a monitorização do comportamento estrutural durante a construção e na fase dos ensaios de recepção englobando a instalação do equipamento de medida, as campanhas de leituras e os relatórios de resultados. Para o efeito foi elaborado pelo LE da FEUP, o Projecto de Monitorização da Ponte Infante D. Henrique, para o qual, além do referido documento base, contribuíram:

- A experiência anterior do LE da FEUP, em intervenções anteriores na mesma área;
- Consultores especialistas na monitorização estrutural, nomeadamente, na área da engenharia civil e da electrónica;
- As opiniões, as sugestões e os esclarecimentos da equipa projectista e do consórcio construtor;
- Trabalhos de investigação e desenvolvimento na área da monitorização estrutural, neste momento em curso no DECivil da FEUP;
- Diversa documentação publicada sobre o assunto, nacional e estrangeira, de entre a qual se destaca, a apresentada pelo LNEC.

É sobre este projecto de monitorização e o início da sua aplicação em obra, que de seguida se descrevem os aspectos essenciais.

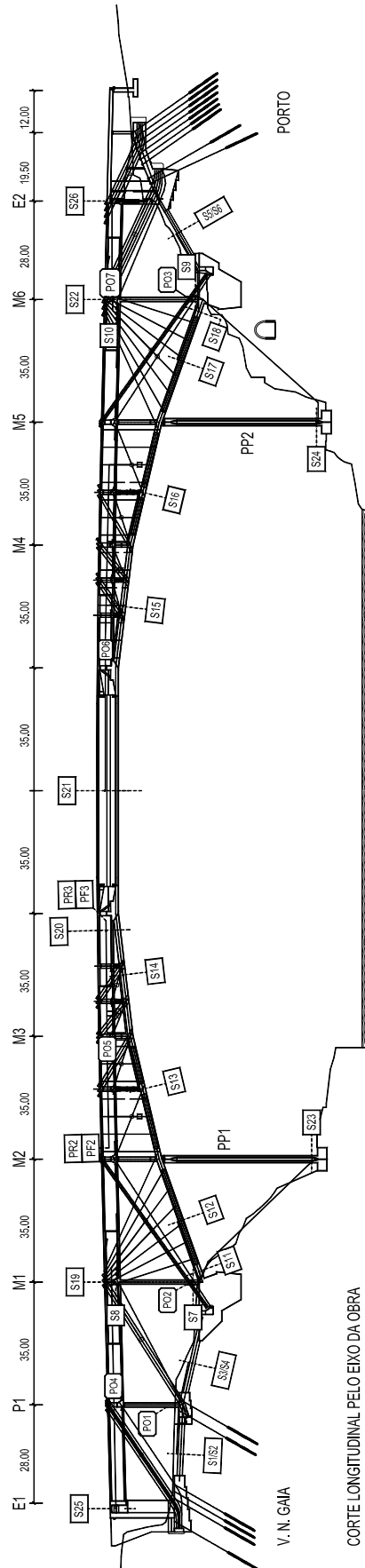


Figura 10.41 — Localização das secções instrumentadas e dos postos de observação da Ponte Infante D. Henrique.

10.4.2 Sistema de monitorização

Para a medição “in-situ” do comportamento estrutural é proposta a instrumentação das principais secções da Ponte, identificadas pela equipa projectista, com extensómetros de resistência eléctrica adequados e de sensores de temperatura, que servirão para a medição das deformações e temperaturas respectivamente, permitindo o controlo da construção e subsequente acompanhamento durante a sua vida útil. No que se refere à medição das extensões do betão, opta-se por extensómetros de resistência eléctrica de embeber no betão, auto-compensados para os efeitos da temperatura, de 350Ω de resistência, fabricados pela Measurements Group, da série EGP-5-350, por serem actualmente indicados como os mais fiáveis para o tipo de aplicação em causa. Neste projecto de monitorização estrutural, propõe-se assim, a substituição dos extensómetros de resistência colados nas armaduras internas do betão, constante do documento base, por extensómetros, também de resistência, mas devidamente encapsulados, embebidos na massa de betão, e colocados em posição idêntica no elemento estrutural, junto à armadura. Os sensores de temperatura são do tipo PT100, fabricados pela empresa Gage Technique, Ld..

A Figura 10.41 apresenta a localização na obra, das secções instrumentadas e dos Postos de Observação aos quais estão ligadas. As secções instrumentadas, em número de 26, são designadas Sn, em que n é o número da secção. Os Postos de Observação, em número de 7, estão indicados por POn, onde n representa o número do posto.

No que diz respeito ao número e à distribuição dos postos de observação, teve-se em atenção o número máximo de sensores que cada um pode suportar, a distância do posto à secção mais afastada, e o faseamento construtivo. A consideração do faseamento construtivo é condicionante no posicionamento dos postos de observação, desde que se pretenda iniciar as leituras a partir do momento em que a secção onde os sensores são instalados é betonada. Daí que, a generalidade dos postos de observação, sejam instalados na retaguarda das secções instrumentadas.

São instrumentadas, com extensómetros e sensores de temperatura, 6 secções das escoras de fundação (S1 a S6), duas secções da base dos montantes M1 e M6 (S7 e S9), 8 secções da poligonal (S11 a S18), 4 secções do tabuleiro (S19 a S22), duas secções dos pilares provisórios PP1 e PP2 (S23 e S24) e duas secções junto aos encontros (S25 e S26). Na secção S22 apenas são instalados sensores de temperatura, em número de 5. Em cada uma das restantes secções, os extensómetros são em número de 4 por secção, colocados um em cada vértice da secção. A instrumentação integral da secção S22 com sensores de temperatura permite analisar, desde os primeiros tempos de execução do tabuleiro, o efeito da insolação na distribuição da temperatura na secção. Atendendo a que a secção transversal do tabuleiro e a exposição solar se mantêm constantes em todo o seu desenvolvimento, a observação e interpretação destes resultados será útil para o decorrer de toda a obra.

Nas secções S8 e S10, localizadas no topo dos montantes M1 e M6, respectivamente, são instalados inclinómetros eléctricos uniaxiais, para medição as rotações no plano vertical definido pelo eixo longitudinal da obra.

Além destas secções instrumentadas da estrutura de betão, mede-se a temperatura num conjunto de cabos, de retenção e de suspensão, e de varões tipo Dywidag, num total de 20 pontos de medida, e de 40 sensores de temperatura.

Para correcção dos valores medidos nos extensómetros, tendo em conta os efeitos da retracção e da fluência, são instalados extensómetros idênticos em provetes prismáticos compensadores. Os prismas compensadores da retracção e da fluência, são dispostos aos pares, em número de 3, designados PRn e PFn, respectivamente, onde n representa o número do par de prismas. O primeiro par de prismas (PR1 e PF1) está localizado na base do montante M1, o segundo está sobre o montante M2, no interior do tabuleiro (PR2 e PF2), e o terceiro sobre o tabuleiro, na proximidade da secção S20 (PR3 e PF3). Cada extensómetro, colocado no interior de cada um destes prismas, é ligado ao posto de observação respectivo, à semelhança das restantes secções em observação.

Em cada um dos postos de observação é instalado o equipamento de aquisição e de armazenamento de informação da Data Electronics, constituído por um módulo central DT505 e respectivos módulos de expansão. A ligação em rede dos postos de observação, e a instalação de um posto de controlo em cada uma das margens, permite o contacto permanente com a obra e a obtenção actualizada em laboratório das medições entretanto realizadas.

10.4.3 Aplicação em obra do sistema de monitorização

Referem-se de seguida alguns aspectos da aplicação em obra do Projecto de Monitorização apresentado, no período compreendido entre os meses de Maio e Outubro de 2000.

No período em referência foram instrumentadas algumas secções das escoras de fundação, as secções localizadas no arranque dos montantes M1 e M6, e a base dos pilares provisórios PP1 e PP2. Foram ainda instalados os postos de observação PO2 e PO3 e dois postos de observação provisórios, não previstos no projecto, para a monitorização da base dos pilares provisórios PP1 e PP2.

A Figura 10.42 apresenta a localização do PO2, de algumas das secções que lhe estão ligadas e o percurso previsto para os respectivos condutores eléctricos. As fotografias da Figura 10.43 dizem respeito à primeira fase de betonagem do montante M1 e do arranque do arco, e foram obtidas durante a instalação dos extensómetros na base do montante M1.

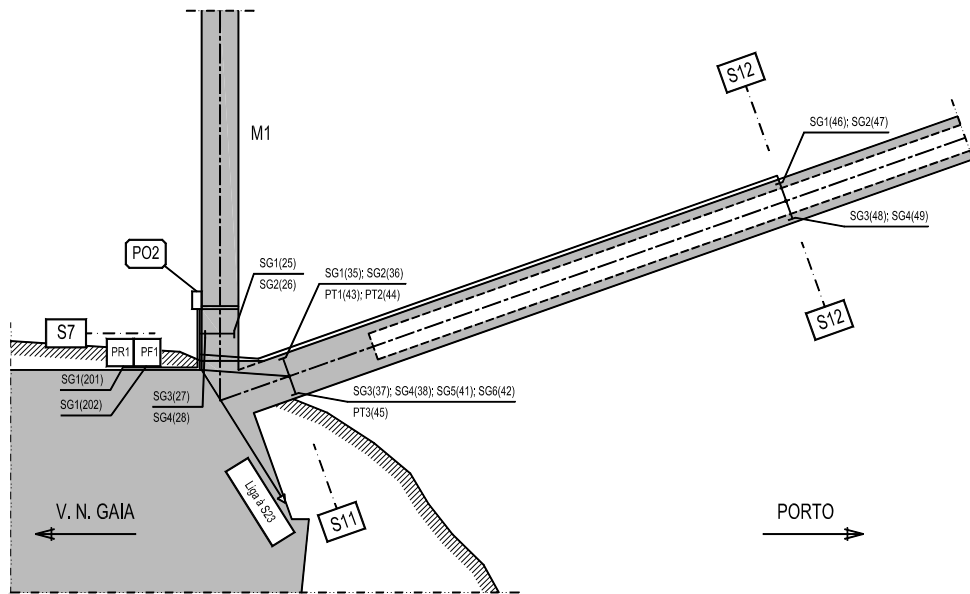


Figura 10.42 — Posicionamento das secções ligadas ao Posto de Observação PO2.



Figura 10.43 — Montante M1 e arranque do arco na fase de instalação dos extensómetros.

Após a primeira fase de betonagem do montante e a desmontagem dos moldes respectivos, procedeu-se à instalação em local protegido, do posto PO2. Para o efeito foi utilizado o vão deixado livre na base do montante (ver Figura 10.44 a)). Uma vez instalado, foi possível desde logo ligar alguns dos extensómetros entretanto instalados, nomeadamente os da secção S7, posicionados na base do próprio montante. A fotografia da Figura 10.44 b) foi obtida durante a fase de instalação do PO2.



a) Vista geral



b) Pormenor do interior da caixa

Figura 10.44 — Posto de observação PO2 instalado numa abertura do montante M1.

A Figura 10.45 ilustra o esquema de ligação dos extensómetros posicionados na base do pilar provisório PP1. Inicialmente estava prevista a ligação destes extensómetros ao Posto de Observação PO2, localizado na base do montante M1. Esta ligação obrigaria à instalação ao longo da escarpa que constitui a encosta, de um conjunto de cabos, tantos quantos o número de extensómetros na secção. No entanto, à data da instalação dos extensómetros, verificou-se que ainda muitos trabalhos decorriam na zona, não sendo por isso seguro a colocação dos referidos cabos. Tendo em atenção as vantagens decorrentes da medição das extensões do betão desde os primeiros dias após a betonagem, e como não havia data previsível para que a segurança desse percurso fosse assegurada, optou-se pela instalação de um Posto de Observação Provisório (POP), na base do próprio pilar provisório.

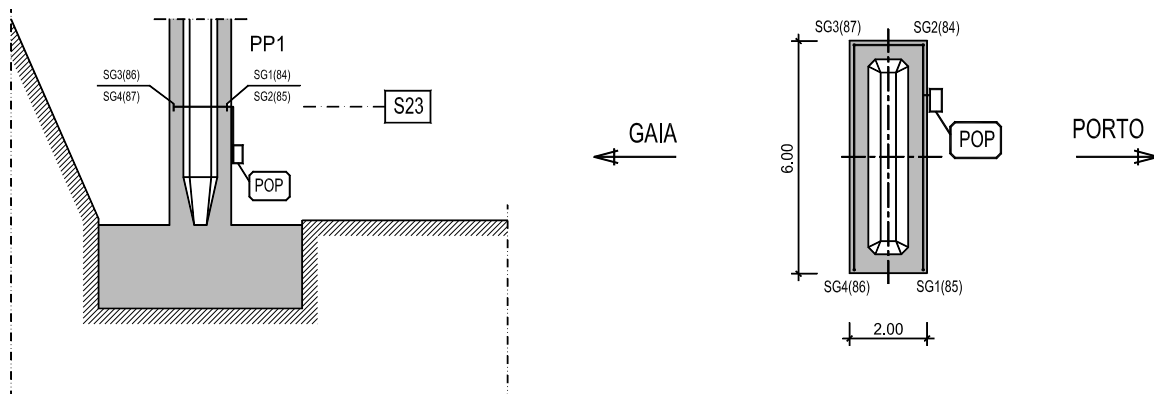


Figura 10.45 — Esquema de ligações do pilar provisório PP1.

Os extensómetros, em número de 4, foram instalados um em cada vértice da secção. A Figura 10.46 ilustra o arranque da zona aligeirada do pilar, e um pormenor de um dos extensómetros instalado.



a) Vista geral



b) Pormenor de um extensómetro instalado

Figura 10.46 — Arranque do pilar provisório PP1.

Esquematiza-se na Figura 10.47 localização do Posto de Observação PO3, e de algumas das secções que a ele estão ligadas.

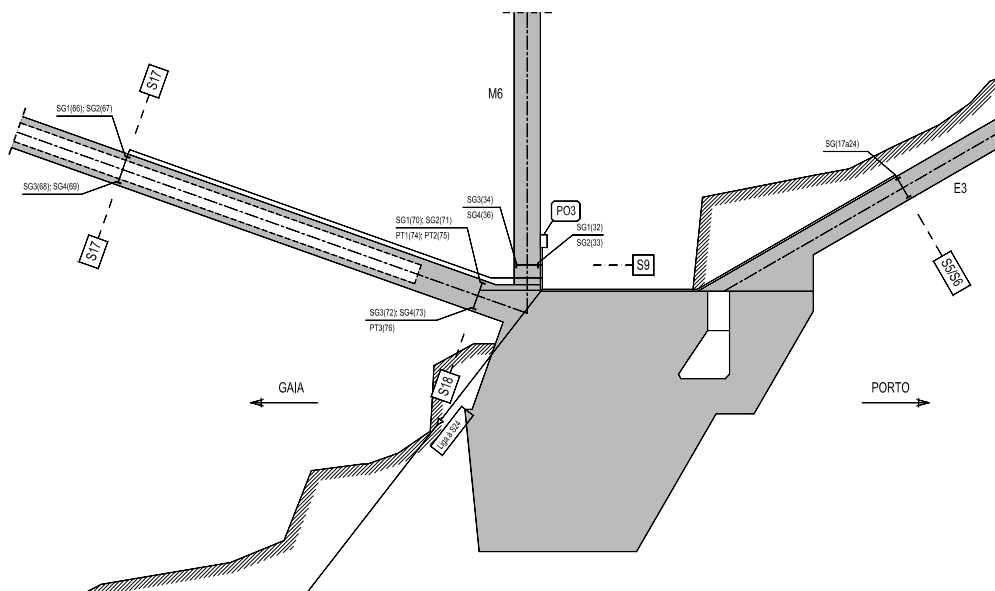


Figura 10.47 — Posicionamento das secções ligadas ao Posto de Observação PO3.

A Figura 10.48 representa um pormenor de um extensómetro instalado no montante M6. Nos montantes os extensómetros não foram instalados no vértice da secção mas um pouco mais recuados da face de menor dimensão. Conforme foi já referido, os montantes têm espessura constante mas largura variável. Ao afastar os extensómetros das faces inclinadas procurou eliminar-se efeitos locais de rotação das direcções principais de tensão.



Figura 10.48 — Extensómetro instalado no montante M6.

Na fotografia da Figura 10.49 é possível observar o montante M6, visto do lado de Gaia, e o pilar provisório PP2, instalado na Av. Gustavo Eiffel, na marginal do Porto.

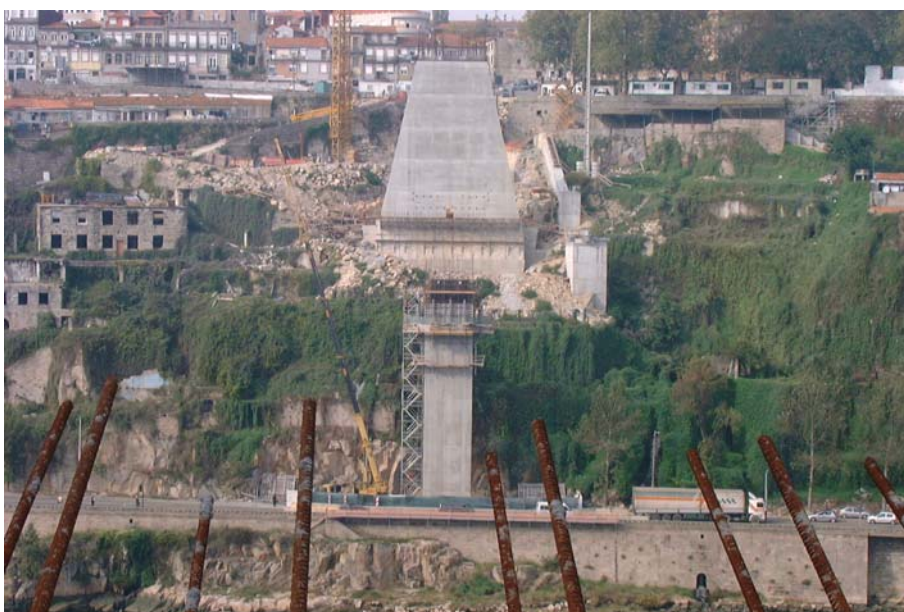


Figura 10.49 — Montante M6 e pilar provisório PP2 (vista do lado de Gaia).

A Figura 10.50 representa o esquema previsto para a ligação da secção S24 ao Posto de Observação PO3. Pelas mesmas razões atrás enunciadas, que conduziram à instalação de um posto de observação provisório na base de pilar PP1, foi alterado o esquema inicialmente previsto, tendo-se instalado um outro posto na base de PP2.

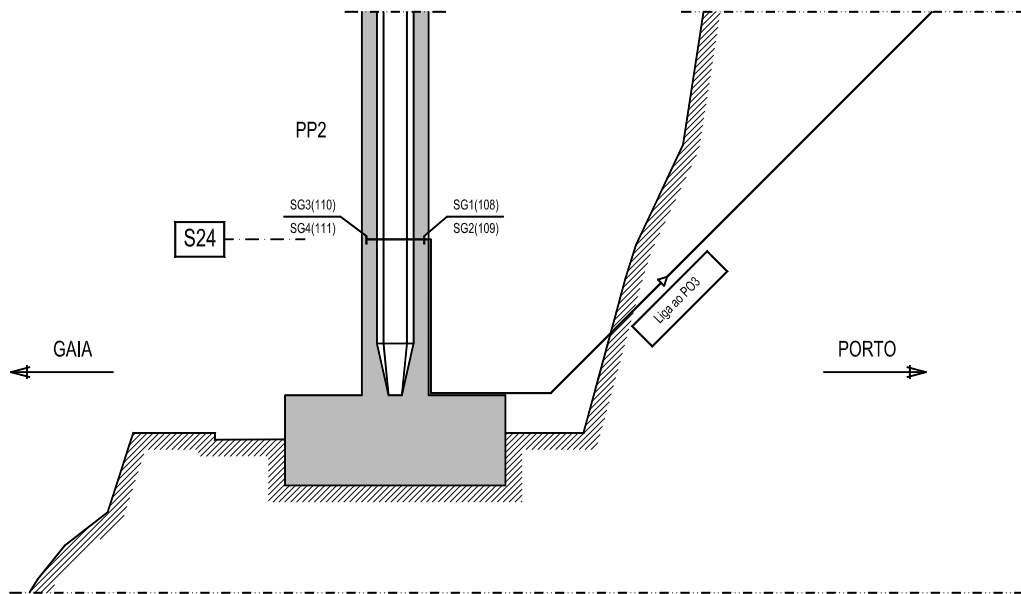


Figura 10.50 — Esquema previsto para a instalação do pilar provisório PP2.

A Figura 10.51 documenta a fase de instalação dos extensómetros na secção S24 do pilar PP2 e a Figura 10.52 um pormenor do referido posto de observação a utilizar provisoriamente, enquanto for possível estabelecer o acesso ao posto de observação PO3.



a) Armadura do PP2 sem cofragem exterior



b) Pormenor da instalação de um extensómetro

Figura 10.51 — Base do pilar provisório PP2 durante a instalação dos extensómetros.



Figura 10.52 — Posto de observação provisório na base do pilar provisório PP2.

A Figura 10.53 apresenta dois pormenores da instalação de extensómetros nas escoras de fundação, a serem utilizadas durante a fase construtiva. Pode observar-se a forma como os cabos condutores são devidamente atados à armadura, no interior da cofragem, para que durante a fase de betonagem, seja reduzido o risco de corte dos cabos, quer como resultado da movimentação dos operários sobre as armaduras, quer devido ao equipamento utilizado para a vibro-compactação do betão.



a) Pormenor de um extensómetro instalado



b) Percurso do cabo condutor

Figura 10.53 — Instalação de extensómetros na escora E3.

10.5 MONITORIZAÇÃO DO VIADUTO SOBRE A VCI NO PORTO

10.5.1 Introdução

A realização da Alameda que liga a Praça das Flores à Praça da Corujeira, no Porto, inclui a construção de um Viaduto, que permite a passagem desnivelada das linhas de caminho de ferro e da futura rede de metropolitano, e de vias rodoviárias, entre as quais a Via de Cintura Interna (VCI). A dimensão do conjunto de vias a transpor associado à necessidade de manutenção, durante a construção, do intenso tráfego nelas existentes, conduziu à concepção de um Viaduto cujo maior vão é de 120m e com um processo construtivo pouco frequente em viadutos urbanos.

Dada a dimensão deste Viaduto, e o interesse demonstrado pelas diversas entidades nele envolvidas, foram elaborados dois planos de monitorização, um durante a fase construtiva e outro durante a exploração, ambos com base num documento elaborado pelo projectista (GRID — Consultas, Estudos e Projectos de Engenharia, Ld^a). É sobre estes planos de monitorização, ainda em curso, que se apresentam de seguida, os aspectos essenciais.

10.5.2 Descrição da estrutura

O Viaduto, de betão armado pré-esforçado, representado na Figura 10.54, desenvolve-se em seis tramos, com vãos que variam entre 23m e 120m, e com comprimento total de 316,5m entre eixos de encontros. O tabuleiro, de secção em caixão monocelular, comporta duas faixas de rodagem para cada direcção e uma zona central pedonal, com uma largura total de 18,0m. A altura de 2,40m do tabuleiro é constante em praticamente toda a extensão, excepto nas proximidades do pilar P3 (mastro), onde aumenta parabolicamente até 3,60m na zona de inserção.

A assimetria da solução de vãos está de harmonia com a assimetria dos tirantes, que se desenvolvem em três planos: um plano de 10 cabos de suspensão sobre o grande vão de 120m, axial em relação ao eixo do tabuleiro, e dois outros planos, de 3 cabos de retenção cada, que têm a sua amarração nas zonas laterais do tabuleiro, sobre o pilar P4.

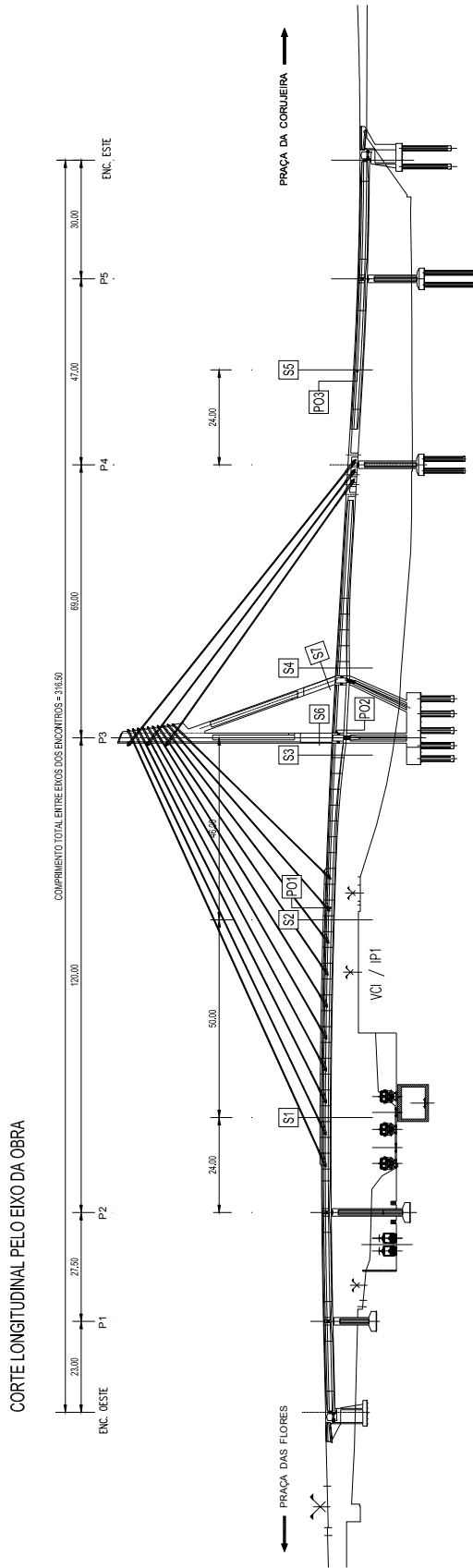


Figura 10.54 — Localização das secções instrumentadas e dos postos de observação do Viaduto sobre a VCI, no Porto.

Na zona de suspensão do vão principal, a transmissão das forças dos tirantes às almas do tabuleiro é realizada em cada secção de amarração, com recurso a duas diagonais, afastadas entre si de 8,0m, constituídas por tubos de aço 250mm×150mm e 8mm de espessura, cheios de betão, e pré-esforçadas por barras com 40mm de diâmetro.

A forma do mastro, conseguida a partir de considerações de ordem estrutural e de integração no tecido urbano em que esta obra se insere, eleva-se a cerca de 70m de altura acima do sobreleito do maciço de encabeçamento das estacas de fundação, estando o topo a 53m do tabuleiro. É constituído por dois fustes parcialmente tubulares ao longo da altura e de secção variável. A concepção de um mastro rígido, constituído por duas peças, permite aumentar a rigidez longitudinal e resolver sem mais cabos de retenção, o desequilíbrio entre o vão de 120m e o vão de 69m que lhe é adjacente. A passagem dos peões ao longo do tabuleiro na zona do mastro foi resolvida com uma abertura em arco, na zona de inserção do mastro com o tabuleiro.

A adopção de uma solução atirantada para o vão principal, surge como uma solução integrada para o suporte estrutural do tabuleiro e do processo construtivo, previsto para a sua execução. Ou, seja, a execução de aduelas por avanços sucessivos a partir do mastro, para construção do 3º e 4º tramos. Os restantes tramos são executados com recurso ao processo tradicional de cimbra a solo.

A especificidade da secção transversal do tabuleiro, em particular na zona atirantada, a forma particular do mastro e o processo construtivo adoptado, justificam um acompanhamento cuidadoso do comportamento estrutural durante e após a construção. Este acompanhamento que inclui essencialmente a medição das extensões de algumas secções do tabuleiro e do mastro e das rotações do nó de ligação do tabuleiro ao mastro, é apresentado de seguida.

10.5.3 Descrição do sistema de monitorização

O sistema de monitorização do Viaduto, durante a fase construtiva (Figueiras e Félix, 2001), prevê a observação de cinco secções do tabuleiro e de duas secções do mastro, num total de sete secções da estrutura de betão. No tabuleiro serão observadas duas secções na zona atirantada, uma secção de cada lado do pilar P3 e uma secção no vão adjacente ao tramo de retenção. No mastro são observadas duas secções, uma secção do montante vertical (escora) e uma secção do montante inclinado (tirante), ambas anexas ao tabuleiro.

Para a observação destas sete secções prevê-se a instalação de 38 extensómetros de resistência eléctrica de embeber no betão e de 11 sensores de temperatura de embeber no betão. Além disso são instalados 4 extensómetros para colar em diagonais interiores do tabuleiro, 3 sensores de temperatura ambiente e 3 extensómetros de embeber em prismas compensadores da retracção do betão. Para a medição de variações angulares longitudinais e transversais junto ao mastro são instalados dois inclinómetros eléctricos biaxiais.

Para a nomenclatura dos sensores a instalar no tabuleiro, são definidos na secção transversal, três alinhamentos verticais e três alinhamentos horizontais.

Os alinhamentos verticais são:

- o alinhamento 1, que contém a face do caixão virada a norte;
- o alinhamento 2, que intersecta a secção do tabuleiro ao eixo;
- o alinhamento 3, que contém a face do caixão virada a sul.

Os alinhamentos horizontais são:

- o alinhamento S, junto do banzo superior da secção em caixão;
- o alinhamento A, que intersecta as almas a meia altura;
- o alinhamento I, junto do banzo inferior.

Os sensores são instalados na zona definida pela intersecção de cada um destes alinhamentos. A designação adoptada para os sensores inclui uma primeira sigla que será *E* no caso de ser um extensómetro ou *T* no caso de ser um sensor de temperatura. Segue-se a referência da secção (*S3*, por exemplo). Finalmente o código da localização do sensor na secção, definido pela intersecção de dois alinhamentos (*1S*, por exemplo).

Na medição das extensões do betão são usados extensómetros de embeber no interior do betão, fabricado pela Measurements Group, da série EGP-5-350, já expostos anteriormente. A medição da temperatura no interior do betão e da temperatura ambiente é feita com recurso a sensores do tipo PT100. Os inclinómetros eléctricos são do modelo KB-1AC fabricados pela Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., cujas principais características foram já resumidas.

Como todos os sensores utilizados neste sistema são eléctricos, fica viabilizada a adopção de um sistema automático de aquisição, programável, com capacidade de armazenamento e de transferência de informação.

O sistema de aquisição adoptado baseia-se no já exposto sistema Datataker da Data Electronics, Ltd.. A associação das secções instrumentadas em postos de observação teve, como é frequente ter, dois condicionantes: tendo em atenção o elevado custo de cada Posto de Observação, razões económicas levam a que se adopte o menor número possível de postos; por outro lado, a distância entre os sensores e o Posto de Observação a que estão ligados não deve ser elevada, sob pena de se perder, em parte ou no todo, o sinal. Este último facto resulta do condicionamento de sinal ser feito apenas no Posto de Observação, e não junto a cada sensor.

São instalados três postos de observação, reunindo o primeiro deles, o PO1, as secções S1 e S2, o PO2 as secções S3 a S7 e o PO3 a secção S5. Estas unidades de aquisição e de armazenamento de informação têm a possibilidade de ligação entre si em rede. Deste modo a programação das leituras e os dados das leituras podem ser processados, em obra, junto de cada um dos postos, ou, caso estejam ligados em rede, junto de apenas um deles. A instalação de um sistema de comunicação remota, via rede GSM, permitirá acompanhar os resultados das leituras também em laboratório.

A frequência das leituras dos sensores, numa obra com as características deste Viaduto, atirantada, com o faseamento construtivo por avanços sucessivos, deverá ser articulada em obra com um conjunto bem definido de tarefas. Por exemplo, dever-se-ão fazer leituras antes e após a betonagem de cada aduela, antes e após a aplicação de tensão em cada um dos cabos, antes e após o fecho do tabuleiro. É nestes casos que melhor se aproveita as potencialidades de um sistema de aquisição automático. A possibilidade de definir intervalos de tempo entre leituras, permite que estas sejam realizadas, sem a intervenção directa de um operador, às mais diversas horas do dia, ou da noite. O registo em obra do dia e da hora de cada uma das fases essenciais, articulado com um intervalo entre leituras de 3 a 6 horas, permitirá obter e interpretar as medições pretendidas. Além de que, conforme foi já referido, viabiliza a medição das 6:00 horas, que tem a vantagem de, em princípio, não haver trabalhos a decorrer em obra e de a temperatura no interior do betão ser mais próxima da uniforme.

Naturalmente que, em certas situações particulares, de que os ensaios de carga estáticos da obra são um exemplo, o acompanhamento no local da obra do processo de medição é essencial.

A zona da obra observada pelo Posto de Observação PO1 inclui as secções S1 e S2 (ver Figura 10.54). Na secção S1 são instalados 8 extensómetros de embeber no betão, três na laje inferior da secção, três na laje superior e dois a meia altura das almas. Na secção S2, além dos extensómetros, em número e com posicionamento idêntico à da secção S1, incluem-se ainda três sensores de temperatura de embeber no betão, dispostos ao longo da alma voltada a sul. Esta opção resulta de ser esta a face mais exposta à radiação solar, pelo que as variações térmicas assumem aqui maior importância. Na Figura 10.55 apresenta-se o esquema de posicionamento destes sensores nas secções respectivas.

Numa secção próxima da S2 são aplicados às diagonais interiores extensómetros para medição das deformações durante a fase de aplicação do pré-esforço e durante e após o tensionamento dos tirantes.

Na Figura 10.56 está representado o posicionamento de cada uma das secções associadas ao PO2. As secções S3 e S4 são secções do tabuleiro que estão localizadas nas proximidades do mastro P3. Em ambas são medidas extensões longitudinais do betão mas apenas na secção S3 são instalados sensores de temperatura de embeber. O posicionamento destes sensores em cada uma das secções

é idêntico às descritas anteriormente e está esquematizado na Figura 10.57. No mastro P3 apenas se mede a extensão e a temperatura em dois dos quatro apoios que intersectam nesta zona o tabuleiro, com a distribuição indicada na Figura 10.58.

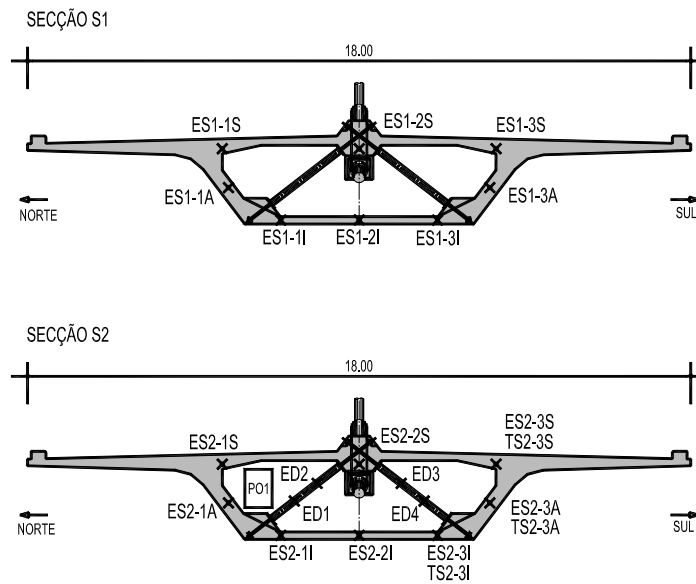


Figura 10.55 — Localização dos sensores instalados nas secções S1 e S2 do tabuleiro.

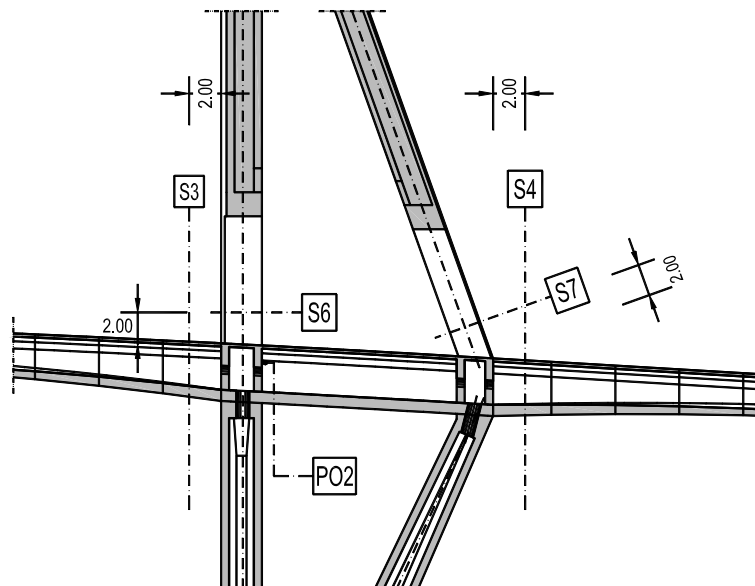


Figura 10.56 — Localização das secções ligadas ao posto de observação PO2.

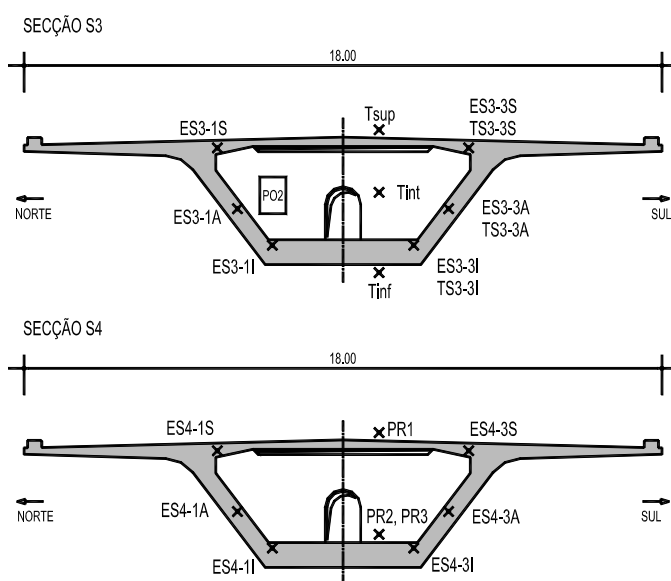


Figura 10.57 — Localização dos sensores instalados nas secções S3 e S4 do tabuleiro.

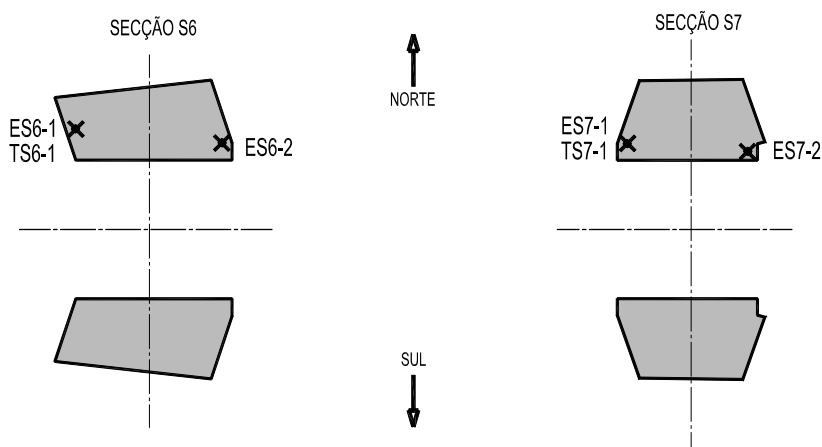


Figura 10.58 — Localização dos sensores instalados nas secções S6 e S7 do mastro.

Durante as fases de betonagem de uma nova aduela do tabuleiro, e de colocação em tensão de um novo tirante, seja de retenção, seja de suspensão, são medidas variações angulares dos pontos de intersecção do tabuleiro com cada um dos elementos do mastro, o vertical e o inclinado. Como são usados inclinómetros biaxiais, é possível medir em cada um destes dois pontos duas variações angulares. No caso em estudo, esta característica revela-se importante, dado o desenvolvimento em planos diferentes dos cabos de suspensão e dos cabos de retenção, poderem introduzir no mastro rotações significativas que convirá observar.

De entre as diversas secções deste Viaduto que se pretendem observar, esta zona do tabuleiro é a primeira a ser executada. Daí que se tenha optado por associar ao posto de observação PO2 um conjunto de outros sensores que vão medir grandezas importantes para a interpretação global dos resultados. Nomeadamente: (1) a medição da temperatura ambiente em três pontos distintos — no interior do tabuleiro, sobre a laje superior do tabuleiro e sob a laje inferior do tabuleiro; (2) e a medição das deformações do betão devido apenas ao efeito da retracção do betão, através da instalação de três primas compensadores, devidamente instrumentados com extensómetros de embeber da mesma série dos utilizados nas restantes secções. Estes prismas compensadores serão instalados, dois no interior do caixão e um sobre a laje do tabuleiro.

A secção S5 localiza-se no 5º tramo (ver Figura 10.54), já fora da zona atirantada do Viaduto, a uma distância apreciável das restantes. No entanto, devido à especificidade desta obra, e como se trata do vão adjacente ao qual se instalam os cabos de retenção, o seu comportamento vai naturalmente ser muito influenciado pelos 3º e 4º tramos. Nesta secção são instalados 6 extensómetros de resistência e 3 sensores de temperatura (ver Figura 10.59).

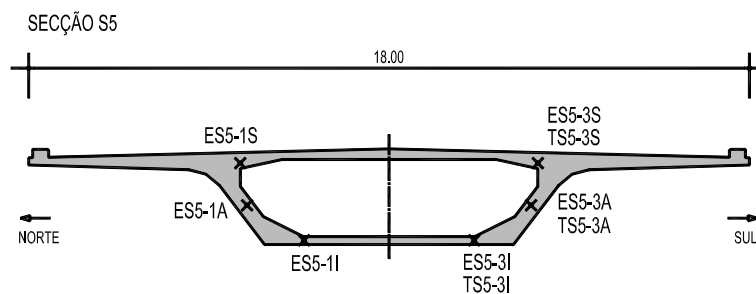


Figura 10.59 — Localização dos sensores instalados na secção S5 do tabuleiro

CAPÍTULO 11

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM SERVIÇO DE UMA

BOX-CULVERT

11.1 INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas de monitorização a estruturas de engenharia civil durante as fases de construção e de exploração fornece informação essencial à análise do seu comportamento. No capítulo anterior foram apresentados alguns casos de obra de aplicação daqueles sistemas à monitorização de estruturas de betão. Em dois deles procedeu-se ainda a uma apresentação sumária dos principais resultados obtidos, tendo como principal objectivo demonstrar as potencialidades destes sistemas. Considera-se agora oportuno, recorrendo a um dos exemplos apresentados no capítulo anterior, exemplificar como pode evoluir a interpretação do comportamento estrutural a partir da medição feita em obra.

Para o efeito foi seleccionada a Passagem Hidráulica PH0.2 constituída por elementos pré-fabricados Box-Culvert (BC), localizada na A2 — Auto-Estrada do Sul, cujo sistema de monitorização está descrito no parágrafo 10.3, reportando-se a medição à fase construtiva que ainda se encontra em curso. Para a conclusão da obra falta a colocação das camadas finais do pavimento, nomeadamente a sub-base, a base e o revestimento betuminoso. Dada a geometria do problema, e em particular a altura de aterro sobre a estrutura (cerca de 9,5m) e a quantidade de veículos pesados do empreiteiro que diariamente circulam sobre a plataforma da Auto-Estrada já construída, não será de prever que a colocação do revestimento betuminoso e a abertura da Auto-Estrada ao trânsito se traduza num incremento significativo das acções sobre a BC. Daí se considerar que a actual análise de

comportamento da estrutura, que tem por base medições realizadas exclusivamente durante a fase construtiva, possa ser considerada uma análise do comportamento em serviço.

Com a monitorização desta estrutura procurou-se contribuir para o conhecimento do comportamento das estruturas enterradas. Para o efeito no presente capítulo são estudados os fenómenos de interacção solo/estrutura, averigua-se a segurança das metodologias simplificadas de cálculo que frequentemente são adoptadas no projecto e tiram-se conclusões sobre a segurança estrutural.

As metodologias simplificadas de cálculo das estruturas enterradas são avaliadas em duas vertentes: (i) cálculo da distribuição de pressões proposta comparando-a com a medição efectuada em obra; (ii) cálculo dos esforços induzidos na estrutura, adoptando a distribuição de pressões e o esquema estrutural previsto naquelas metodologias simplificadas, comparando-os com os esforços avaliados a partir da medição das extensões do betão.

A determinação das tensões ou dos esforços a que as secções instrumentadas estão sujeitas a partir da medição de extensões conduz à necessidade de utilização de modelos capazes de relacionar aquelas grandezas. No caso particular das estruturas de betão, quando a medição se prolonga por um certo período de tempo, estes modelos de análise devem incluir o efeito da maturação do betão e os efeitos reológicos como a retracção e a fluência. Justifica-se por isso a exposição detalhada de um modelo de comportamento dos materiais estruturais desenvolvido para a interpretação das extensões medidas a partir do qual é possível estimar a distribuição dos esforços instalados.

O presente capítulo inicia-se com a descrição sumária da obra em apreço e da localização dos instrumentos de medida na secção. Segue-se a apresentação dos métodos simplificados de cálculo de estruturas enterradas e a sua avaliação tendo em atenção a distribuição de pressões do solo sobre a BC. Na apresentação do modelo que permite a obtenção dos esforços em secções instrumentadas a partir das extensões medidas é detalhada a metodologia adoptada na caracterização do comportamento dos materiais estruturais, com especial incidência na caracterização do comportamento do betão. Procede-se então à avaliação das metodologias simplificadas de cálculo com base na comparação entre os esforços calculados e os esforços obtidos a partir da medição. Finalmente são tecidas considerações finais sobre o comportamento das estruturas enterradas.

11.2 DESCRIÇÃO DA SECÇÃO INSTRUMENTADA

A obra em análise é uma estrutura pré-fabricada designada por Box-Culvert, que constitui uma passagem hidráulica sob a plataforma de uma Auto-Estrada, cuja secção transversal está representada na Figura 11.1. É constituída por pares de módulos idênticos em forma de U com 2,50m de comprimento, que em obra são sobrepostos formando uma secção interior rectangular. Estes

elementos foram executados com betão da classe C30/37 e as armaduras, representadas na Figura 11.2, são de aço do tipo A500NR.

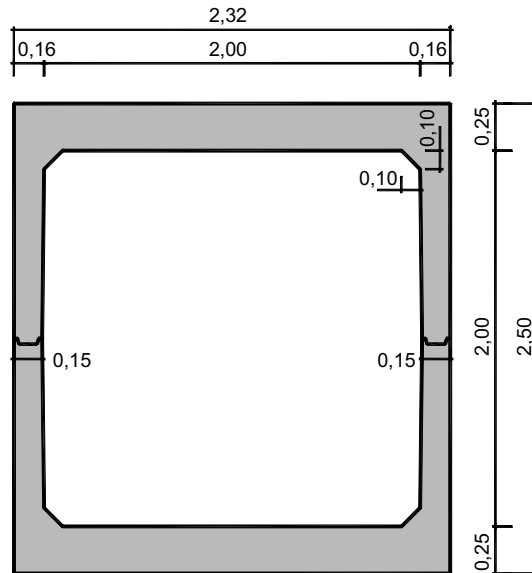


Figura 11.1 — Seção transversal da BC instrumentada.

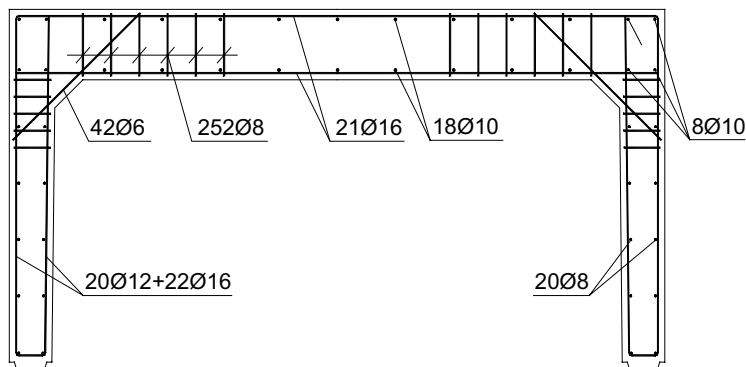


Figura 11.2 — Armaduras da seção instrumentada.

Os trabalhos associados à instrumentação iniciaram-se em Outubro de 2000 com a instalação de extensómetros de embeber no betão num dos módulos e respectiva betonagem. Em obra o módulo instrumentado viria a ser o módulo superior. Foram dispostos dez extensómetros de resistência eléctrica de embeber no betão, conforme esquematizado na Figura 11.3, que definem cinco alinhamentos S1 — S5. Os alinhamentos S1 e S2 localizados no topo dos montantes, junto à inserção destes na travessa, permitem obter, além dos esforços axiais, os esforços de flexão

máximos ou muito próximo dos máximos nos montantes. Os alinhamentos S3 a S5 da travessa permitem traçar o diagrama de esforços de flexão na travessa e a partir do esforço axial obter uma parcela da resultante dos impulsos aplicados aos montantes. O alinhamento S4 posicionado a meio vão da travessa fornece informação sobre o momento flector máximo aplicado.

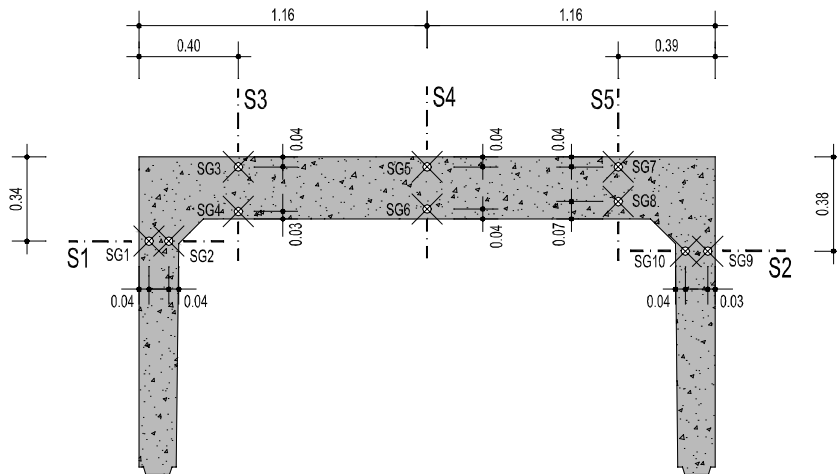


Figura 11.3 — Localização dos extensómetros e dos alinhamentos S1 a S5.

Na BC instrumentada com extensómetros são instaladas quatro células de pressão que permitem a medição da pressão de contacto do solo sobre a BC na interface solo/estrutura (ver Figura 11.4). As células PC1 a PC3 medem a pressão vertical do solo sobre a travessa e a célula PC4 mede a componente devida ao impulso horizontal. As cotas da figura localizam o centro de gravidade do elemento sensor de cada célula de pressão. Estes pontos serão adiante referidos como P1 — P4. São ainda instalados dois sensores de temperatura, um medindo a temperatura do aterro, na proximidade de uma das células de pressão, e outro sensor instalado junto do posto de observação medindo a temperatura ambiente que se faz sentir no interior da BC.

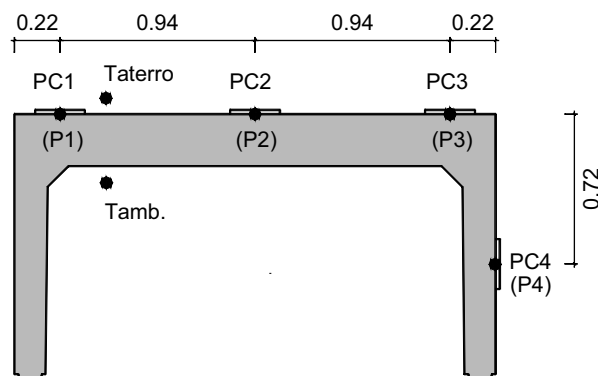


Figura 11.4 — Posicionamento das células de pressão e dos sensores de temperatura.

11.3 RESULTADOS DA OBSERVAÇÃO

A deposição do material de aterro sobre o elemento superior da BC iniciou-se em 14 de Fevereiro de 2001, que coincidiu com o início das leituras dos sensores instalados. Nessa data já tinha sido colocado o aterro que ladeia os montantes até cerca de 0,40m abaixo da cota superior da BC. O elevado ritmo de trabalho em obra conduziu a que ao fim de sete dias a plataforma definida pelo aterro tenha atingido a cota actual que é de aproximadamente 9,5m acima da travessa superior da BC.

Tendo por base a medição efectuada até 18 de Novembro de 2001 pode afirmar-se que se verificou naquele período uma forte dependência da temperatura quer no valor da pressão do solo quer nos esforços induzidos na estrutura. Para melhor compreensão desta dependência apresenta-se na Figura 11.5 a evolução da temperatura registada diariamente às 6:00 horas pelo sensor que mede a temperatura ambiente no interior da BC e pelo sensor que mede a temperatura do aterro junto da célula de pressão PC1. Os valores em falta correspondem a interrupções da medição e resultaram de falhas na alimentação do sistema de aquisição. Estas falhas repercutem-se naturalmente nas medições efectuadas pelos diversos sensores.

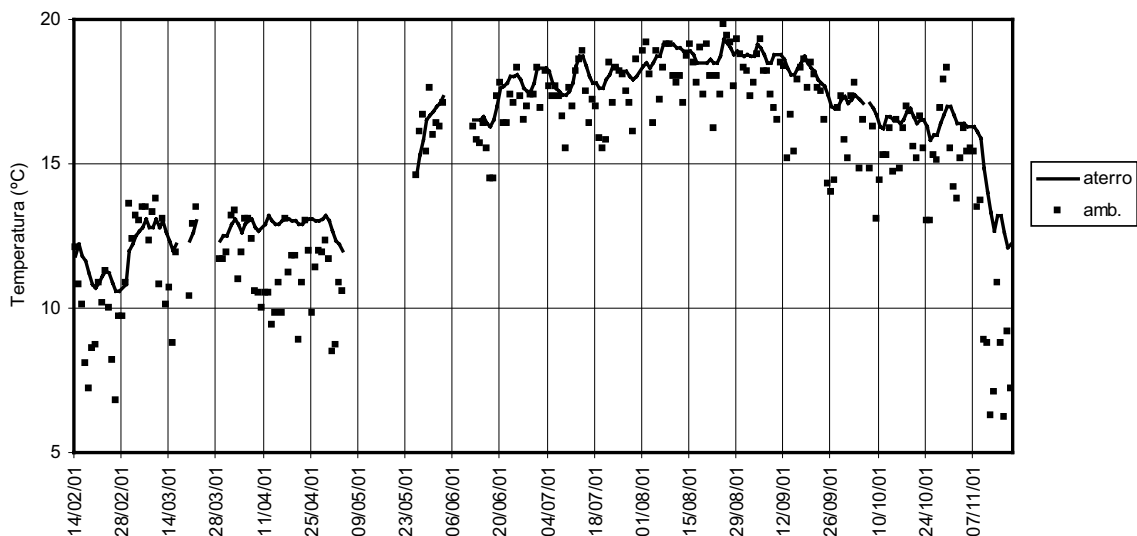


Figura 11.5 — Temperatura observada diariamente às 6:00 horas.

A evolução diária da pressão medida pelas quatro células de pressão às 6.00 horas está representada na Figura 11.6. A comparação desta figura com a anterior evidencia a dependência da pressão com a variação diária da temperatura demonstrando que a pressão aumenta com o aumento da temperatura. O fabricante indica que a sensibilidade dos sensores de pressão à variação da temperatura é inferior a 0,01%FS. Atendendo a que a gama de medição das células de pressão é de

500kPa, isto significa que a variação máxima de sinal será de 0,05kPa/°C. Não pode por isso a variação de pressão medida ser atribuída à sensibilidade do sensor à variação de temperatura. As células de pressão estão a medir uma variação da pressão que é real e que terá origem, provavelmente, na variação volumétrica do próprio elemento estrutural e eventualmente também do próprio solo.

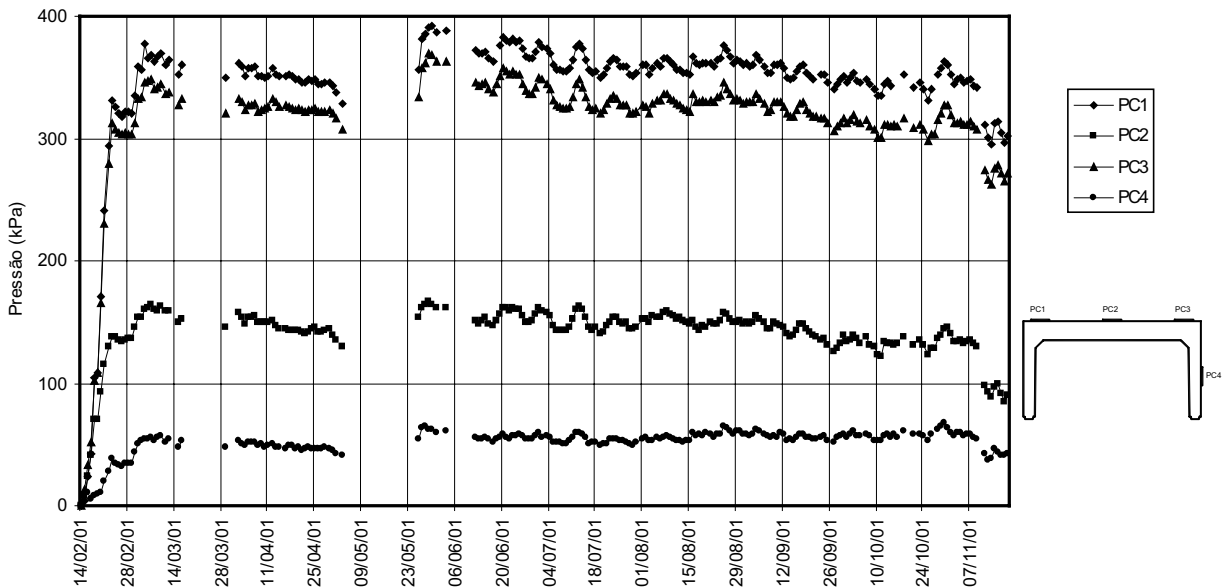


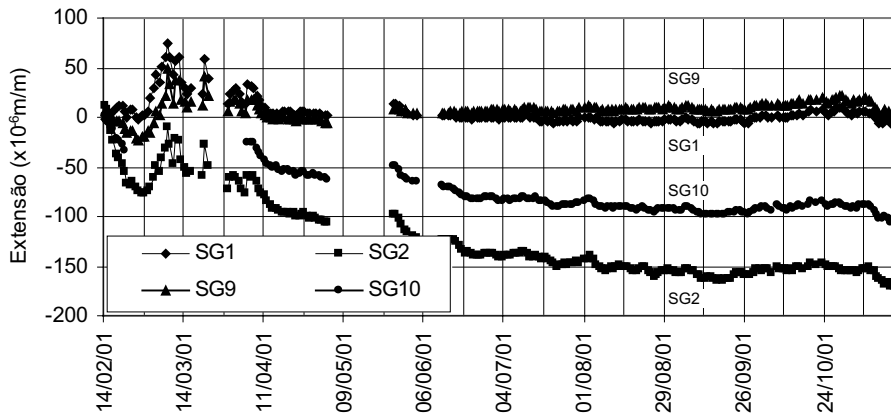
Figura 11.6 — Pressão do solo medida diariamente às 6:00 horas.

A Figura 11.7 ilustra o resultado da medição efectuada diariamente às 6:00 horas nos extensómetros de embeber no betão, nos montantes e na travessa.

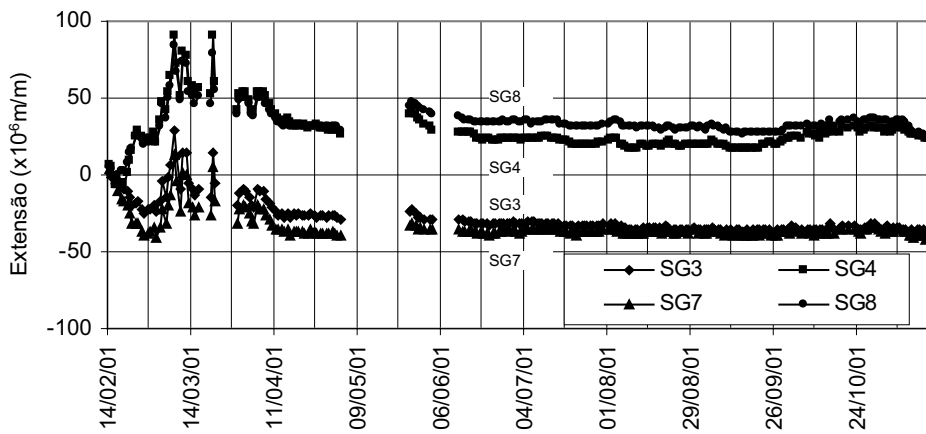
A análise de resultados que se segue tem por base a totalidade da medição efectuada em obra, mas sempre que se julgue conveniente reporta-se a períodos limitados previamente estabelecidos com o objectivo de tentar eliminar, ou pelo menos minorar o efeito da variação da temperatura no comportamento da estrutura.

Na avaliação das pressões actuantes sobre a BC são discutidos os resultados da medição efectuada logo após a colocação da totalidade do material de aterro (22 de Fevereiro de 2001) até aos últimos valores registados (18 de Novembro de 2001). Para cada célula de pressão é indicado o valor máximo observado.

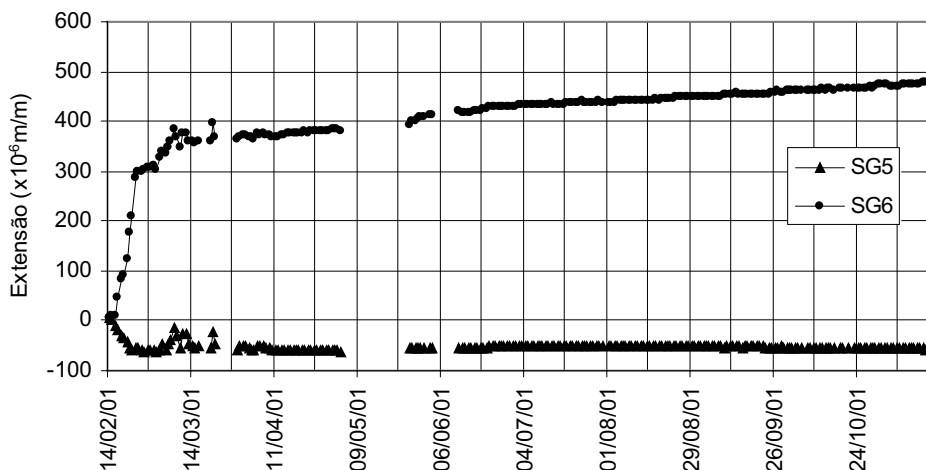
O ajuste do modelo de comportamento do betão tendo em atenção a maturidade, a retracção e a fluência é realizado tendo por base o período compreendido entre 12/6/2001 e 9/11/2001 dado que o método adoptado torna-o pouco sensível ao efeito da temperatura.



a) extensómetros dos alinhamentos S1 e S2 dos montantes;



b) extensómetros dos alinhamentos S3 e S5 da travessa;



c) extensómetros do alinhamento de meio vão da travessa (S4).

Figura 11.7 — Extensão medida diariamente às 6:00 horas.

Na análise dos esforços instalados na BC procede-se à comparação entre os valores medidos e os valores calculados recorrendo a metodologias simplificadas de cálculo. Neste caso adopta-se uma situação específica de carregamento que corresponde à média dos valores medidos durante o mês

de Agosto de 2001. A opção deste mês decorre do facto de neste período de tempo a temperatura ter sido muito estável e por consequência também as pressões e as extensões medidas apresentaram reduzida variabilidade.

11.4 DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES DO SOLO SOBRE A BOX-CULVERT

11.4.1 Introdução

A análise das estruturas enterradas e em particular das BC tem sido objecto de estudos com vista à quantificação da pressão do solo que sobre elas se exerce, acção que serve de base ao dimensionamento deste tipo de estruturas. Tem-se observado que os fenómenos de interacção solo/estrutura desempenham um papel de fundamental importância na definição do valor e da distribuição das pressões, de que se salientam como factores principais nomeadamente a rigidez do solo de fundação e do material de aterro, a rigidez da própria estrutura, o comportamento das interfaces solo/solo e solo/estrutura e o faseamento construtivo. Outros factores não menos importantes, mas raramente tidos em conta, são os efeitos de origem térmica e a ocorrência da fase fendilhada no betão.

A complexidade do mecanismo que define a distribuição de pressões em estruturas enterradas é correctamente simulada apenas com recurso a modelos numéricos elaborados. Daí que continuem a surgir diversas propostas de métodos simplificados de cálculo, inicialmente baseados em resultados experimentais e na extrapolação da observação de outras estruturas, e mais recentemente com base em modelos numéricos mais refinados. O desenvolvimento daqueles modelos simplificados de cálculo visa essencialmente servir de base ao projecto e à verificação da segurança destes elementos estruturais enterrados.

A observação do comportamento das estruturas enterradas constitui um elemento essencial à definição e análise dos parâmetros que intervêm nos modelos numéricos mais complexos e à validação dos modelos simplificados de cálculo.

É neste contexto que se procede à apresentação sucinta de três métodos simplificados de cálculo com vista à obtenção da distribuição da pressão do solo sobre estruturas enterradas do tipo BC e é feita a respectiva aplicação ao caso de obra em apreço. Estabelece-se então a comparação destes resultados com os valores obtidos a partir da medição efectuada em obra. Para melhor enquadramento do problema é feita uma referência inicial ao fenómeno responsável pela redistribuição de pressões neste tipo de estruturas.

11.4.2 Distribuição de pressões em estruturas enterradas

A maior deformabilidade do material de aterro quando comparada com a deformabilidade da BC origina uma migração de tensões para as zonas mais rígidas da BC. A Figura 11.8 apresenta um esquema simplificado do processo de redistribuição de pressões que ocorre nestes sistemas estruturais, discretizando o aterro em blocos, uns centrais localizados sobre a travessa da estrutura e outros laterais à BC. A maior deformabilidade dos blocos laterais vai originar, além da mobilização de tensões tangenciais na interface solo/estrutura a mobilização de tensões tangenciais solo/solo. No que diz respeito ao bloco de aterro localizado sobre a travessa da BC, se esta for suficientemente flexível pode-se idealizar a geração de blocos com deslocamentos relativos entre si, a que corresponde o desenvolvimento de tensões tangenciais nas interfaces. Este processo tem por consequência a diminuição da pressão vertical na zona central da travessa e o aumento desta nas zonas localizadas nas proximidades dos montantes.

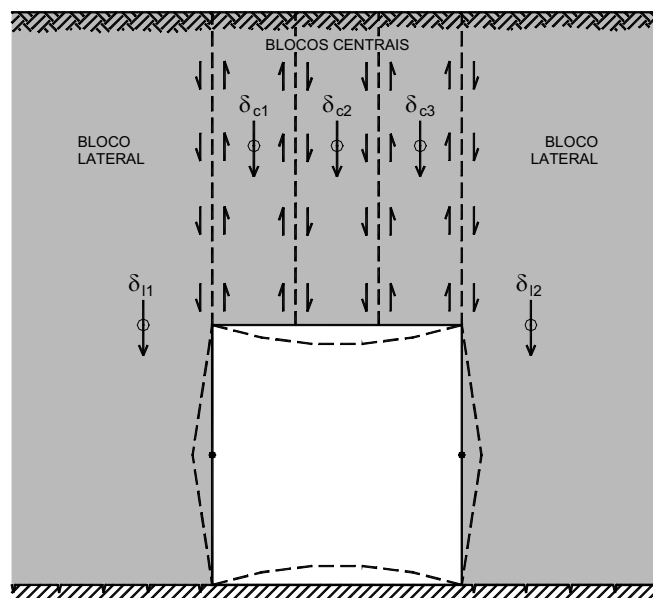


Figura 11.8 — Processo de redistribuição de pressões numa BC.

Em estruturas mais rígidas a pressão do solo sobre a travessa será aproximadamente constante mas de valor superior ao do peso das terras acima localizadas e essa diferença é tanto maior quanto mais deformável for o solo. Por outro lado em estruturas mais flexíveis verifica-se uma maior concentração de pressões verticais sobre os montantes a que corresponde uma diminuição mais ou menos significativa das pressões na zona central da travessa.

11.4.3 Métodos simplificados de cálculo

Pretende-se com os métodos simplificados de cálculo a obtenção duma distribuição de pressões sobre a BC, ainda que conservativa, seja tão próxima da real quanto possível e calculada a partir de um número mínimo de parâmetros, associada a um esquema estrutural simples, de preferência uma estrutura porticada plana.

Um primeiro modelo mais simples consiste em admitir que a estrutura constituída por um quadro biarticulado com apoios elásticos está sujeita a uma distribuição de pressões conforme se esquematisa na Figura 11.9 (Maprel, 1998) sendo,

γ — o peso específico do solo;

K_0 — o coeficiente de impulso em repouso;

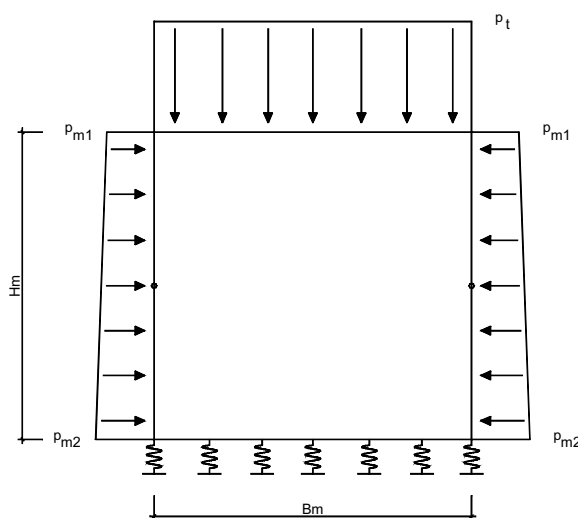
H_a — a altura de aterro acima da BC;

B_m e H_m — as dimensões médias da BC dadas por,

$$B_m = B + e_m, \quad (11.1)$$

$$H_m = H + e_t, \quad (11.2)$$

em que, B e H são as dimensões interiores da BC, e_m representa a espessura dos montantes e e_t representa a espessura da travessa.



Legenda:

$$p_t = \gamma H_a$$

$$p_{m1} = K_0 \gamma H_a$$

$$p_{m2} = K_0 \gamma (H_a + H_m)$$

Figura 11.9 — Modelo simplificado de cálculo (Maprel, 1998).

A pressão do solo sobre a travessa tem valor constante e é dada pelo peso das terras localizadas acima do nível correspondente. Os impulsos são obtidos a partir do coeficiente de impulso em repouso. Na quantificação dos esforços da estrutura o peso próprio é desprezado.

Este modelo não considera a interacção solo/estrutura nem tem em consideração o efeito da rigidez do solo e da estrutura.

Uma evolução deste método que procura atender ao efeito da redistribuição de tensões na travessa (Cardoso, 1998) está representado na Figura 11.10.

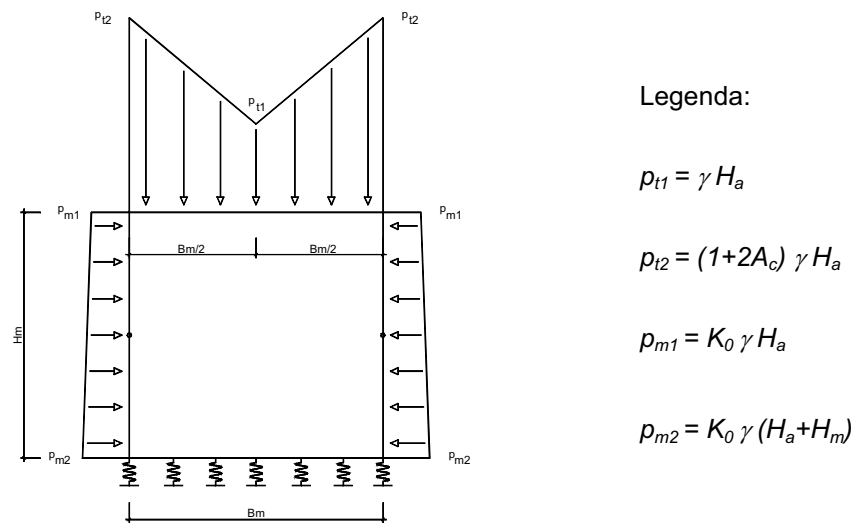


Figura 11.10 — Modelo simplificado de cálculo (Cardoso, 1998).

A distribuição de pressões sobre a travessa apresenta uma variação linear com o máximo sobre os montantes e o mínimo a meio vão. O coeficiente de majoração das pressões $(1+2A_c)$ é obtido por extrapolação a partir da metodologia proposta por Maston (Long e Vezole, 1993) para tubos enterrados. O Quadro 11.1 (Cardoso, 1998) fornece os valores de A_c para tubos de diâmetro D , com altura de aterro sobre o coroamento de H_a , a partir de um parâmetro r_s designado razão de assentamentos definido como,

$$r_s = (s_{aterro} - s_{tubo}) / s_{aterro} , \quad (11.3)$$

em que s_{aterro} e s_{tubo} representam os assentamentos do aterro e do tubo respectivamente, ao nível do coroamento.

Quadro 11.1 — Valores do coeficiente A_c .

R_s	H_e/D		
	1	2	≥ 3
0	0,00	0,00	0,00
0,1	0,20	0,22	0,22
0,5	0,20	0,50	0,50
1,0	0,20	0,60	0,69

Os valores da razão de assentamentos são de difícil quantificação resumindo-se no Quadro 11.2 os valores recomendados para tubos de rigidez elevada em função da rigidez da fundação.

Quadro 11.2 — Valores recomendados para a razão de assentamento.

Tubo rígido assente sobre:	r_s
— Rocha ou solo muito rígido	1,0
— Casos ordinários	0,5 – 0,8
— Terrenos brandos em que o tubo se enterre	0,0 – 0,5

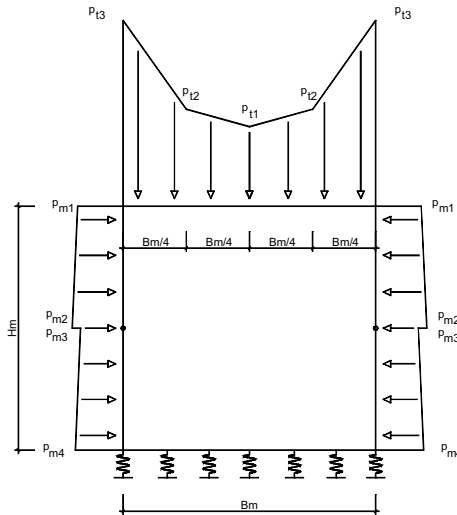
Na extrapolação da metodologia desenvolvida para estruturas enterradas de secção circular para secções rectangulares propõe-se a definição de um diâmetro equivalente D_{eq} da secção rectangular definido por:

$$D_{eq} = 2(B_m + H_m)/\pi \quad (11.4)$$

Nesta metodologia inclui-se um estimativa do efeito da redistribuição de tensões no contorno da estrutura, mas não se considera o processo construtivo nem as descontinuidades existentes entre o solo e a estrutura.

Num estudo mais recente (Sang, 2000) foi utilizado um modelo numérico com base no método dos elementos finitos que considera a não linearidade das leis constitutivas dos materiais (solo, betão e aço), a interface solo/betão e a simulação do processo construtivo. Após a análise de um conjunto

significativo de estruturas com diferente geometria e com diferentes alturas de aterro foi proposta uma metodologia que assenta na determinação da rigidez do sistema estrutural, constituído pela estrutura e pelo solo envolvente, a partir da qual são definidos cinco parâmetros, s_1 a s_5 . A Figura 11.11 esquematiza a distribuição de pressões proposta.



Legenda:

$$\begin{aligned}
 p_{t1} &= s_1 \gamma H_a & p_{m1} &= s_4 K_0 \gamma H_a \\
 p_{t2} &= s_2 \gamma H_a & p_{m2} &= s_4 K_0 \gamma (H_a + H_m / 2) \\
 p_{t3} &= s_3 \gamma H_a & p_{m3} &= s_5 K_0 \gamma (H_a + H_m / 2) \\
 & & p_{m4} &= s_5 K_0 \gamma (H_a + H_m)
 \end{aligned}$$

Figura 11.11 — Modelo simplificado de cálculo (Sang, 2000).

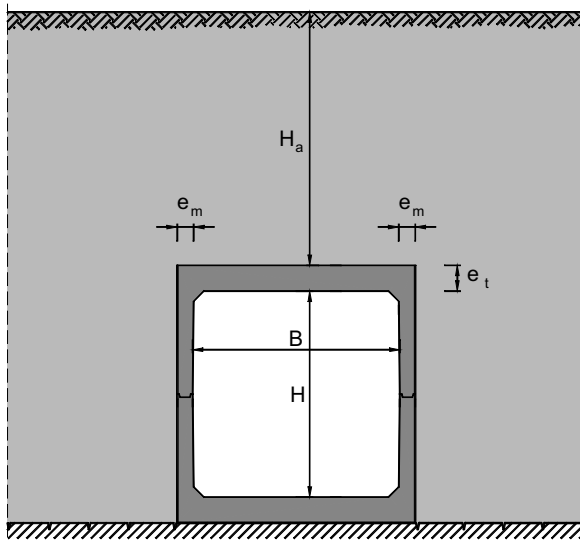
A rigidez do sistema estrutural K_e é definida como a força vertical que é necessário aplicar a meio vão da travessa superior da BC para que neste ponto se obtenha um deslocamento vertical unitário. Os parâmetros s_1 a s_5 são definidos para diferentes valores de K_e (Sang, 2000) e em termos indicativos podem ser resumidos conforme o Quadro 11.3. No entanto estes parâmetros devem ser agravados ou reduzidos em função da grandeza de outros factores que afectam a distribuição de pressões sobre a BC, como por exemplo, a altura dos aterros e a altura dos montantes.

Quadro 11.3 — Valores indicativos dos parâmetros s_1 a s_5 (Sang, 2000).

Rigidez do sistema estrutural K_e	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
BC muito rígidas	1,20	1,30	1,80	1,20	1,00
BC muito flexíveis	0,60	0,90	2,50	1,20	1,00

11.4.4 Aplicação das metodologias simplificadas

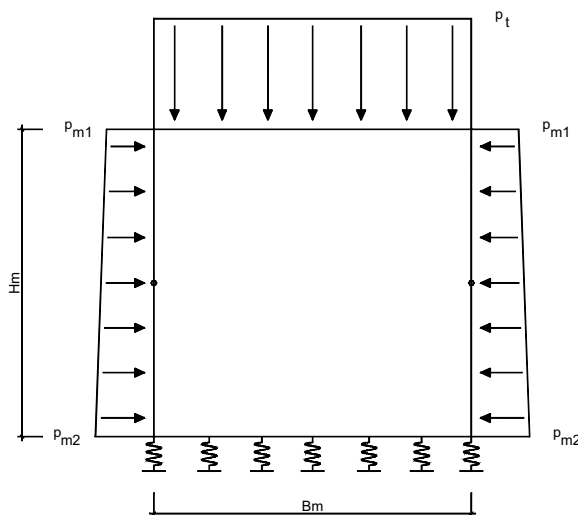
Tendo como dados do problema o sistema estrutural constituído pela BC instrumentada e o solo envolvente que foi devidamente caracterizado, é calculada a distribuição de pressões do solo sobre a estrutura com base em cada uma das metodologias simplificadas expostas anteriormente. Os dados essenciais à resolução do problema são apresentados na Figura 11.12. Os resultados da aplicação da primeira metodologia apresentada (Maprel, 1998) estão resumidos na Figura 11.13.



Dados:

- $B=2,00m$ $H_a=9,50m$
- $H=2,00m$ $\gamma=23kN/m^3$
- $e_t=0,25m$ $\Phi=35^\circ$
- $e_m=0,16m$ $K_o=0,426$
- $B_m=2,16m$
- $H_m=2,25m$

Figura 11.12 — Geometria do sistema estrutural da BC instrumentada.



Legenda:

- $p_t=218kPa$
- $p_{m1}=93kPa$
- $p_{m2}=115kPa$

Figura 11.13 — Aplicação do modelo simplificado de cálculo (Maprel, 1998).

Para aplicação da segunda metodologia exposta (Cardoso, 1998) obtém-se sucessivamente:

$$D_{eq} = 2 \times (2,16 + 2,25) / \pi = 2,81m, \quad (11.5)$$

$$H_a / D_{eq} = 9,5 / 2,81 = 3,38. \quad (11.6)$$

Admitindo $r_s=0,8$ e consultando o Quadro 11.1 vem,

$$A_c = 0,61. \quad (11.7)$$

A Figura 11.14 apresenta os resultados encontrados para a distribuição de pressões sobre a BC segundo esta metodologia.

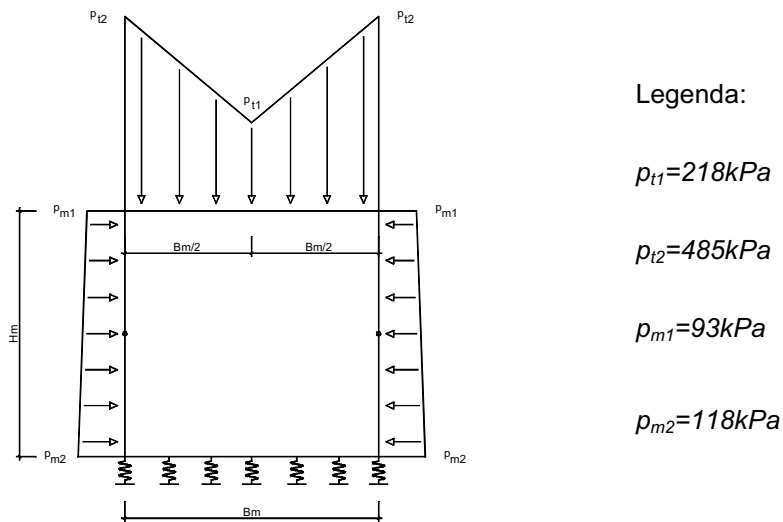
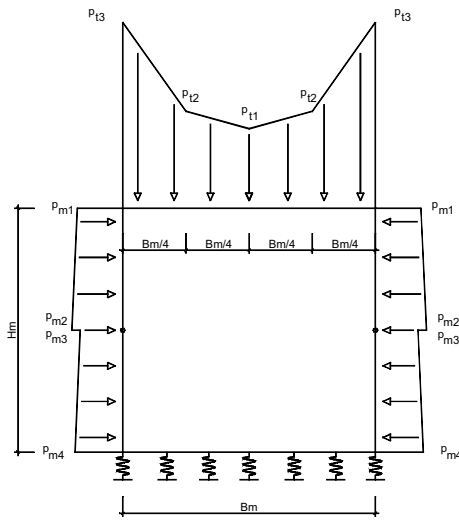


Figura 11.14 — Aplicação do modelo simplificado de cálculo (Cardoso, 1998).

A aplicação do terceiro método descrito anteriormente (Sang, 2000) implica o cálculo da rigidez do sistema estrutural que neste caso foi avaliada em $K_e = 217MN/m/m$. Os valores dos parâmetros s_1 a s_5 foram então obtidos graficamente a partir do valor de K_e e constam do Quadro 11.4. A Figura 11.15 apresenta o resultado do cálculo das pressões sobre a BC de acordo com esta metodologia.

Quadro 11.4 — Valores obtidos para os parâmetros s_1 a s_5 .

s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
0,9	1,1	2,1	1,2	1,0



Legenda:

$$p_{t1}=197kPa \quad p_{m1}=112kPa$$

$$p_{t2}=240kPa \quad p_{m2}=126kPa$$

$$p_{t3}=459kPa \quad p_{m3}=105kPa$$

$$p_{m4}=118kPa$$

Figura 11.15 — Aplicação do modelo simplificado de cálculo (Sang, 2000).

11.4.5 Avaliação das metodologias simplificadas de cálculo

Os resultados da medição efectuada em obra permitiram obter o valor da pressão que o aterro exerce sobre o contorno exterior da BC em quatro pontos P1 a P4, conforme se ilustra no esquema da Figura 11.16. Estes pontos de medição estão em correspondência com as células de pressão PC1 a PC4 referidas anteriormente (ver Figura 11.4).

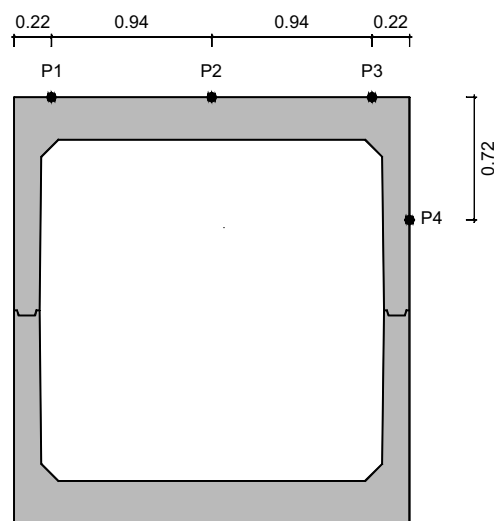


Figura 11.16 — Pontos de medição da pressão sobre a BC.

No Quadro 11.5 apresenta-se um resumo dos valores da pressão calculados nestes quatro pontos a partir dos diagramas expostos anteriormente e os correspondentes valores medidos em obra. Como o resultado da medição exhibe elevada variabilidade ao longo do tempo (ver Figura 11.6) seleccionam-se os valores máximos observados.

Quadro 11.5 — Pressão em quatro pontos da BC instrumentada [kPa].

		P1	P2	P3	P4
Valores calculados em modelos simplificados	(Maprel, 1998)	218	218	218	100
	(Cardoso, 1998)	434	218	434	100
	(Sang, 2000)	376	197	376	104
Valores máximos observados ⁽¹⁾		400	175	378	76

Observação: ⁽¹⁾ medição efectuada diariamente entre 22/02/2001 e 18/11/2001.

No que diz respeito aos valores da pressão vertical medida em P1, P2 e P3 verifica-se que os valores calculados pelo segundo e o terceiro métodos conduzem a uma distribuição de pressões muito idêntica àquela que é observada em obra. Em particular atendendo à pressão máxima (pontos P1 e P3) o segundo método aproxima-se um pouco por excesso, o terceiro muito ligeiramente por defeito. Em termos de distribuição de pressões o primeiro deles não pode ser considerado representativo da realidade. Qualquer um dos métodos sobrestima o valor da pressão horizontal no ponto em apreço.

O facto de o valor da pressão horizontal medido no ponto P4 ser inferior aos estimados por qualquer um dos métodos pode ser resultado da diminuição local da pressão vertical. De facto, devido ao fenómeno da redistribuição de pressões anteriormente descrito, ao aumento da pressão vertical sobre a travessa da BC na zona dos montantes corresponde uma diminuição da pressão vertical na vizinhança dessa zona, não só sobre a BC na direcção de meio vão da travessa, mas também na direcção oposta, no solo que ladeia a estrutura.

Atendendo a que o coeficiente de impulso traduz a relação existente entre a tensão horizontal verificada e a tensão vertical de referência, o cálculo daquele coeficiente a partir da pressão horizontal medida conduziria a um coeficiente de impulso inferior ao activo. Não sendo isto possível apenas se pode concluir que de facto a pressão vertical naquela zona da BC é seguramente inferior à tensão de referência.

Atendendo a que a tensão vertical de referência $\sigma_{v,ref}$ é neste caso dada por:

$$\sigma_{v,ref} = \gamma H = 23 \times (9,5 + 0,72) = 235 \text{ kPa} , \quad (11.8)$$

pode definir-se um intervalo de valores do coeficiente de impulso em correspondência com os limites mínimos e máximos da pressão horizontal medida (ver Figura 11.6) dado por,

$$K_{min} = \sigma_{h,medido} / \sigma_{v,ref} = 37/235 = 0,157 , \quad (11.9)$$

$$K_{máx} = \sigma_{h,medido} / \sigma_{v,ref} = 76/235 = 0,323 . \quad (11.10)$$

O limite inferior (K_{min}) corresponde aproximadamente a 60% do coeficiente de impulso activo, e o limite superior ($K_{máx}$) está compreendido entre o coeficiente de impulso activo e o de repouso.

11.5 MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS ESTRUTURAIS

11.5.1 Introdução

Na monitorização de estruturas de betão a obtenção de esforços a partir de extensões em secções instrumentadas com extensómetros exige a adopção de um modelo de comportamento do betão que tenha em consideração a maturidade e os fenómenos reológicos do betão como a retracção e a fluência.

Com vista à análise do comportamento da BC foi desenvolvido um modelo que simula o comportamento do betão e do aço tendo por base as regras enunciadas no Eurocódigo 2 (EC2), e no que este é omissivo o Model Code 1990 (MC90). O modelo desenvolvido inclui o efeito da maturação e os fenómenos da retracção e da fluência. Não obstante a importância de que se reveste não foi incluído na presente análise o efeito da temperatura. Contudo, tendo em atenção o processo utilizado no ajuste do comportamento dos materiais, esta limitação do modelo não altera significativamente as conclusões apresentadas.

11.5.2 Módulo de elasticidade

No âmbito do presente estudo assume especial importância a evolução do valor do módulo de elasticidade, que está associada ao conceito de maturação do betão. Sendo o EC2 omissivo nesta matéria, e na ausência de resultados experimentais mais precisos, o módulo de elasticidade tangente de um betão com idade t pode ser estimado de acordo com o MC90 através da seguinte expressão:

$$E_c(t) = \beta_E(t) E_{c(28)} , \quad (11.11)$$

sendo $E_{c(28)}$ o módulo de elasticidade tangente do betão aos 28 dias de idade e $\beta_{E(t)}$ uma função que caracteriza a sua evolução com o tempo dada por:

$$\beta_E(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)}, \quad (11.12)$$

com

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left(s\left(1 - \sqrt{28/t}\right)\right), \quad (11.13)$$

em que t é expresso em dias e s é um coeficiente que depende do tipo de cimento utilizado de acordo com os valores indicados no Quadro 11.6.

Quadro 11.6 — Valores do coeficiente s .

Tipo de cimento	s
Cimentos de endurecimento lento, S	0,38
Cimentos de endurecimento normal ou rápido, N, R	0,25
Cimentos de endurecimento rápido e alta resistência inicial, RS	0,20

11.5.3 Retracção do betão

Na determinação do efeito da retracção do betão na BC é adoptado o modelo apresentado no Anexo 1 da Parte 1.1 do EC2. Trata-se de um modelo multiplicativo de dois factores em que um deles traduz o valor que a extensão por retracção atinge a tempo infinito e o outro depende da evolução do fenómeno no tempo. Esta expressão, que permite estimar as extensões de retracção ou de expansão é dada por:

$$\varepsilon_{cs}(t - t_s) = \varepsilon_{cso} \beta_s(t - t_s), \quad (11.14)$$

em que:

ε_{cso} — é a extensão nominal de retracção;

$\beta_s(t - t_s)$ — é o coeficiente que define o desenvolvimento da retracção no tempo;

t — é a idade do betão em dias na data considerada;

t_s — é a idade do betão em dias no início da retracção ou da expansão.

Devido à multiplicidade de factores de que depende a retracção, alguns deles não contemplados no EC2, o valor da retracção calculado com base neste modelo pode diferir significativamente dos obtidos experimentalmente. O ajuste da curva teórica da retracção proposta pelo EC2 aos valores obtidos experimentalmente pode ser feita quer corrigindo o valor da retracção a tempo infinito quer o seu desenvolvimento no tempo (Santos, 2001). Nesta metodologia as expressões da extensão nominal da retracção e do coeficiente que define o desenvolvimento da retracção no tempo são dadas por:

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm})\beta_{RH} C_1, \quad (11.15)$$

$$\beta_s(t-t_s) = \left[(t-t_s) / (0,035h_o^2 + t-t_s) \right]^{0,5C_2}, \quad (11.16)$$

em que C_1 é o coeficiente de ajuste do valor da retracção a tempo infinito, C_2 é o coeficiente de ajuste do seu desenvolvimento no tempo e as restantes variáveis têm o significado expresso no EC2.

11.5.4 Fluência do betão

De acordo com o EC2 o coeficiente de fluência é definido como a relação entre a deformação de fluência e a deformação elástica aos 28 dias de idade, calculada com $E_{c(28)}$, e a sua determinação assenta num modelo multiplicativo de dois factores, um dos quais traduz o valor que o coeficiente de fluência terá a longo prazo e o outro a evolução do fenómeno no tempo. A expressão do coeficiente de fluência é dada por:

$$\phi(t, t_o) = \phi_o \beta_c(t-t_o), \quad (11.17)$$

em que,

t_o — é a idade do betão expressa em dias à data do carregamento;

ϕ_o — é o coeficiente nominal de fluência;

$\beta_c(t-t_o)$ — é o coeficiente que define o desenvolvimento da fluência no tempo.

O ajuste do modelo teórico proposto pelo EC2 para o fenómeno da fluência aos valores experimentais pode ser feito, à semelhança do referido para a retracção, através da introdução de dois coeficientes de ajuste (Santos, 2001). Um para corrigir o valor do coeficiente de fluência a tempo infinito e outro para ajustar a evolução do fenómeno no tempo. Adoptando esta metodologia as expressões que definem o coeficiente nominal de fluência e coeficiente que traduz o desenvolvimento do fenómeno da fluência com o tempo são dadas por:

$$\phi_o = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_o) C_3, \quad (11.18)$$

$$\beta_c(t-t_o) = \left(\frac{t-t_o}{\beta_H + t-t_o} \right)^{0,3 C_4}, \quad (11.19)$$

em que C_3 é o coeficiente de ajuste do valor do coeficiente de fluência a tempo infinito, C_4 é o coeficiente de ajuste do seu desenvolvimento no tempo e as restantes variáveis têm o significado expresso no EC2.

11.5.5 Armaduras passivas

A relação entre tensões e deformações do aço das armaduras ordinárias assenta no diagrama bilinear referido no EC2. Considera-se que o aço exhibe um comportamento idêntico à tracção e à compressão. Admitindo-se que em serviço não é excedido o valor característico da tensão de cedência à tracção (f_{yk}) a relação entre as tensões e as extensões pode ser expressa pela relação:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad (11.20)$$

sendo:

σ_s — a tensão a que o aço está sujeito;

E_s — o módulo de elasticidade;

ε_s — a extensão correspondente.

O valor adoptado para o módulo de elasticidade está de acordo com o indicado no EC2:

$$E_s = 200 \text{ GPa}. \quad (11.21)$$

11.6 ESFORÇOS INDUZIDOS NA ESTRUTURA

11.6.1 Introdução

Com base na modelação do comportamento dos materiais estruturais que constituem a BC e a partir da medição das extensões efectuadas em obra, é possível estimar os esforços axiais e de flexão induzidos na estrutura. Conforme foi exposto anteriormente a obtenção de esforços a partir da medição das extensões carece de um ajuste do modelo que tenha em atenção as propriedades efectivas dos materiais utilizados e as condições ambientais a que a estrutura está sujeita. Este

ajuste deverá ser realizado com base na medição efectuada em obra o que aconteceu na BC em análise, dadas as particularidades do sistema de monitorização adoptado.

Das medições efectuadas verifica-se que assume especial relevo o efeito da variação de temperatura sobre as extensões do betão e a pressão do solo. Atendendo a que a informação recolhida não permite ainda estabelecer com segurança uma lei que relacione as três grandezas em análise, opta-se no ajuste do modelo de comportamento do betão por definir um período de referência compreendido entre 12/6/2001 e 9/11/2001 durante o qual se registou uma certa uniformidade de valores de temperatura. A Figura 11.17 apresenta os valores da temperatura uniforme a que a BC está sujeita, observada às 6:00 horas no período em referência enquanto a Figura 11.18 apresenta os correspondentes valores da temperatura diferencial.

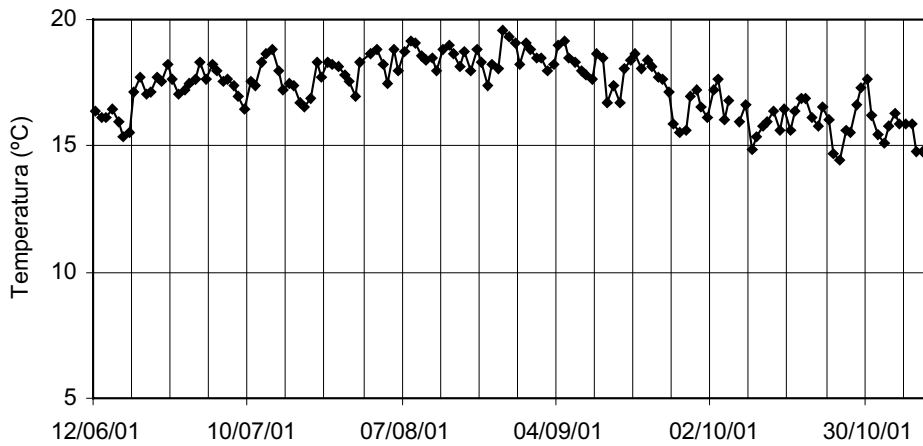


Figura 11.17 — Temperatura uniforme $(T_{amb.} + T_{aterro})/2$.

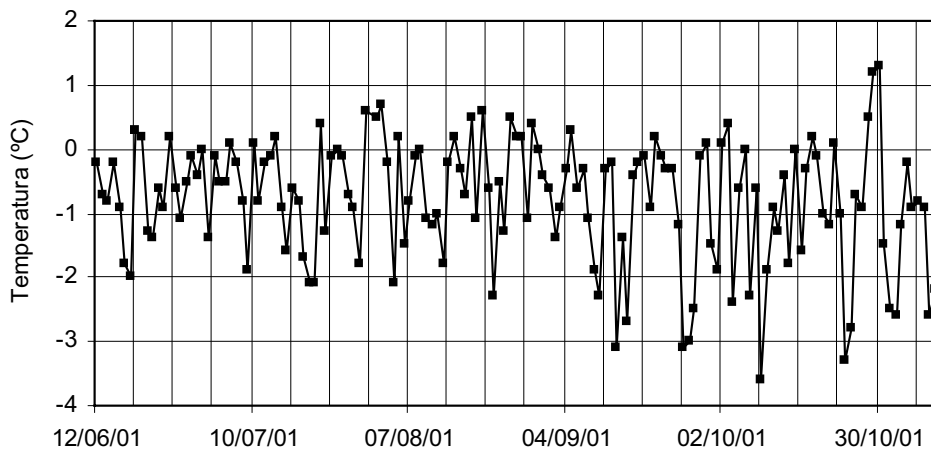


Figura 11.18 — Temperatura diferencial $(T_{amb.} - T_{aterro})$.

Uma vez ajustado o modelo de comportamento dos materiais que constituem a BC é possível proceder a uma avaliação das metodologias simplificadas de cálculo, comparando os esforços calculados com os obtidos a partir da medição efectuada em obra. Como adiante se verá o modelo de comportamento dos materiais exibiu um melhor ajuste durante o mês de Agosto, período que por isso mesmo foi adoptado para fornecer os valores experimentais necessários a esta avaliação.

11.6.2 Ajuste do modelo de comportamento do betão

Foram definidas anteriormente as expressões que traduzem o comportamento do betão e do aço e que permitem a determinação dos esforços nos alinhamentos instrumentados da BC a partir das extensões medidas. Nesta obra são conhecidas as características dos materiais betão e aço, a geometria da estrutura executada, as condições climatéricas envolventes, a data de betonagem do módulo instrumentado e as datas de carregamento.

O ajuste dos modelos adoptados que regem os fenómenos da retracção e da fluência, conforme descrito anteriormente, pode ser feito com base na determinação de quatro coeficientes de ajuste (Santos, 2001), dois para a modelação da retracção e outros dois para a modelação da fluência. Nestas situações assume especial importância a caracterização em obra de cada um destes fenómenos.

Esta caracterização pode ser conseguida com prismas compensadores em que seja possível isolar os efeitos devidos a cada um destes fenómenos, realizados com o mesmo betão do elemento estrutural em análise, betonados em simultâneo e sujeitos às mesmas condições de exposição ambiental. No caso particular da obra em apreço não foram utilizados estes prismas pelo que houve necessidade de recorrer a um método indirecto para o ajuste da retracção e da fluência. Com base na medição da pressão vertical do solo sobre a BC nos pontos P1 a P3, é possível definir um diagrama parabólico de distribuição de pressões passando pelos respectivos pontos de medição, conforme se esquematiza na Figura 11.19. A área do diagrama assim definido representa a resultante vertical da acção que o solo exerce sobre a travessa da BC (R_p) que por consequência será muito aproximadamente igual à soma do esforço axial induzido nos dois montantes (N_1+N_2).

Por outro lado, a partir da medição dos extensómetros instalados nos alinhamentos S1 e S2 dos montantes e utilizando os modelos de comportamento do betão e do aço descritos, é possível estabelecer uma relação entre a extensão medida e o valor do esforço axial a que cada um dos montantes está sujeito. Esta relação é expressa em função dos coeficientes de ajuste $C1$ a $C4$.

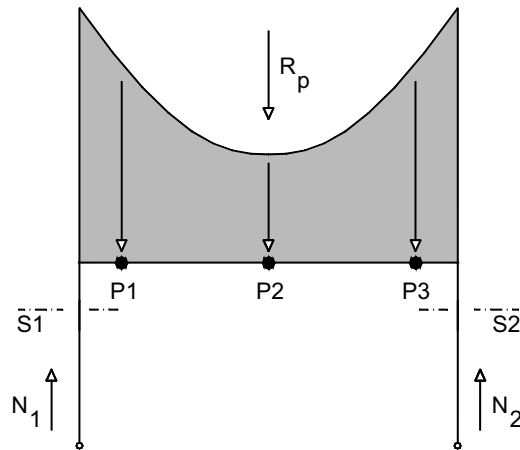


Figura 11.19 — Diagrama parabólico da pressão do solo.

No período em referência, em que se considera que as variações de temperatura assumem um significado reduzido, e com base no método dos mínimos quadrados, procedeu-se então à minimização do erro da diferença da resultante vertical calculada através dos dois processos expostos — a partir do valor medido pelas células de pressão e da correspondente medição efectuada pelos extensómetros — para diferentes combinações dos coeficientes *C1* a *C4*.

Quadro 11.7 — Soluções possíveis para os coeficientes de ajuste.

<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	$\Phi(t_{\infty}, t_0)$	$\epsilon_{cs}(t_{\infty}-t_s)$
0,529	0,989	0,580	0,792	0,759	154×10^{-6}
0,110	0,226	0,602	0,188	0,795	30×10^{-6}
0,143	0,555	0,622	0,403	0,818	43×10^{-6}
0,509	1,706	0,712	0,857	0,930	139×10^{-6}
0,499	0,810	1,1590	2,052	1,487	147×10^{-6}
0,727	0,436	0,786	1,668	1,014	222×10^{-6}
0,420 (*)	0,787 (*)	0,744 (*)	0,993 (*)	0,970	124×10^{-6}

(*) — valor médio dos anteriores.

Utilizando este método e eliminando as soluções que não obstante serem uma solução matemática do problema não constituíam uma solução realista das grandezas em análise, obtém-se um conjunto de coeficientes de ajuste possíveis, alguns dos quais se apresentam no Quadro 11.7. A par destes coeficientes de ajuste solução do problema apresentam-se os correspondentes valores do coeficiente de fluência e da extensão de retracção a tempo infinito. A última linha do quadro contém o valor médio dos coeficientes de ajuste encontrados, valor que será adoptado na análise que se segue.

A Figura 11.20 ilustra a resultante vertical da acção do solo sobre a BC (R_p), obtida a partir da medição com as células de pressão, e a resultante do esforço axial induzido nos montantes (N_1+N_2), obtida a partir da medição com os extensómetros instalados nos alinhamentos S1 e S2, para o valor médio dos coeficientes $C1$ a $C4$ calculados. Nesta figura pode verificar-se que é durante o mês de Agosto que as constantes adoptadas melhor ajustam aquelas duas curvas.

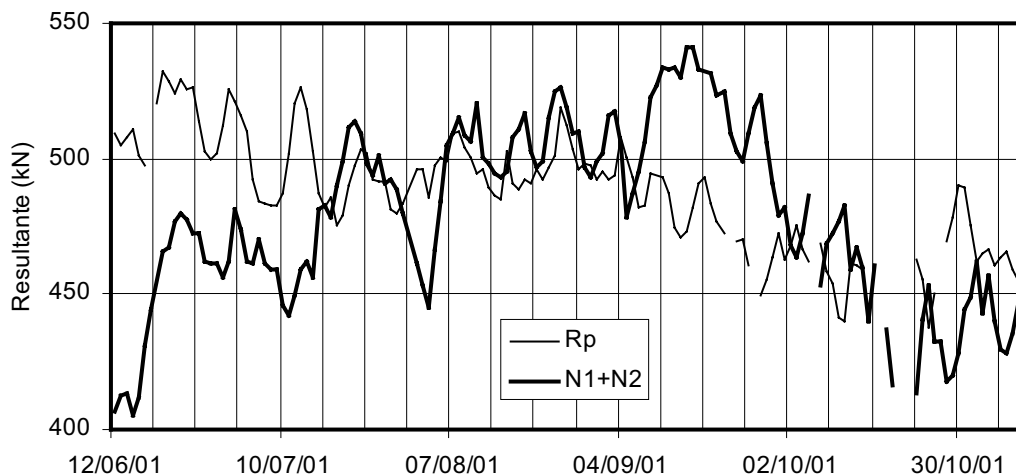


Figura 11.20 — Ajuste da resultante vertical dos esforços à pressão.

Uma melhor percepção do significado dos coeficientes de ajuste obtidos neste estudo pode ser feita comparando a evolução da extensão devida à retracção obtida com o modelo de ajuste com os preconizados pelo EC2, para uma espessura equivalente $h_o=160\text{mm}$ e humidade relativa $HR=80\%$. Verifica-se que a retracção do modelo é significativamente inferior à indicada pelo EC2, com uma redução que no início se situa nos 30% mas que no final atinge os 55%.

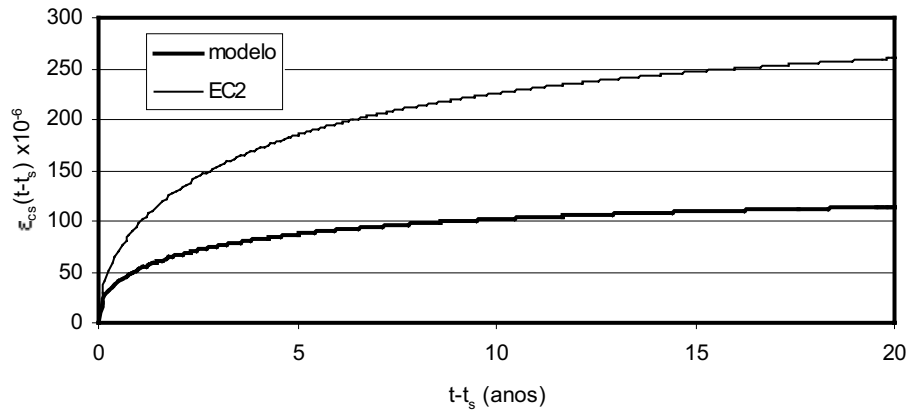


Figura 11.21 — Extensão devida à retração.

No que diz respeito à fluência verifica-se um melhor ajuste do modelo aos valores indicados no EC2. A Figura 11.22, que apresenta a evolução do coeficiente de fluência para as duas situações, ilustra este ajuste. A tempo infinito o coeficiente de fluência obtido a partir do modelo será aproximadamente 75% do valor indicado no EC2.

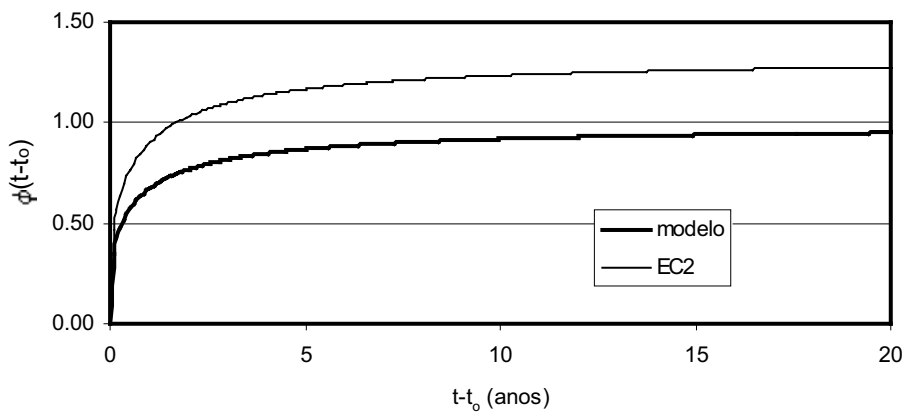


Figura 11.22 — Coeficiente de fluência.

Estas variações dos valores experimentais relativamente ao que está regulamentado são frequentes e estão relatadas em diversos casos de obra (Santos e Fernandes, 1993 e Garcia,1995). A observação do comportamento de estruturas de betão e em particular a observação das pontes, tem fornecido um importante manancial de informação sobre os fenómenos da retração e da fluência que permitem justificar a gama de valores encontrados para a obra em apreço.

O valor da extensão por retração é fortemente condicionado pelas condições de exposição ambiental. As faces de betão de uma estrutura enterrada, de que a BC é um exemplo, estão expostas

a diferentes condições. Junto da face exterior em contacto com o solo não há chuva nem vento nem radiação solar e a humidade relativa está condicionada pela humidade do próprio aterro. Já na face interior o vento, a temperatura e a humidade relativa são muito variáveis. Tratando-se de um estrutura pré-fabricada, e atendendo a que decorreram cerca de quatro meses entre o fabrico e a sua instalação em obra, sucede ainda que não são conhecidas as condições de exposição ambiental a que o betão esteve sujeito durante esse período.

Um estudo que contém a análise dos fenómenos da retracção e da fluência em quatro pontes de betão que têm vindo a ser observadas pelo LNEC (Santos, 2001) inclui a obtenção dos coeficientes de ajuste para um significativo conjunto de provetes instalados em obra, sujeitos a diferentes condições de exposição ambiental. O Quadro 11.8 resume os valores mínimos e máximos dos coeficientes de ajuste apresentados no referido estudo. De um modo geral pode afirmar-se que os valores mais baixos dos coeficientes $C1$ e $C2$ dizem respeito a provetes instalados sobre o tabuleiro enquanto os valores mais elevados se referem a provetes instalados em zonas abrigadas reforçando a hipótese de que a chuva terá um efeito benéfico na redução do desenvolvimento da retracção e do seu valor a longo prazo, enquanto o vento e a exposição ambiental terão um efeito contrário.

Quadro 11.8 — Valores mínimos e máximos dos coeficientes de ajuste (Santos, 2001).

Ponte	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$
S. João	[0,566; 1,127]	[0,816; 1,074]	[0,791; 1,386]	[0,540; 1,085]
Guadiana	[0,544; 1,443]	[0,630; 1,055]	[0,486; 1,340]	[0,218; 1,193]
Freixo	[0,260; 3,082]	[0,163; 1,533]	[0,834; 1,232]	[0,494; 1,564]
Miguel Torga	[0,528; 3,646]	[0,240; 1,416]	[1,016; 1,813]	[0,770; 1,077]

Comparando o Quadro 11.7 com o Quadro 11.8 verifica-se que a generalidade dos valores dos coeficientes de ajuste $C1$ e de $C2$ estimados para a BC estão dentro do intervalo definido experimentalmente pela observação de pontes. Além disso, atendendo a que estão contidos na metade inferior desse intervalo, isto significa que o betão terá um comportamento à retracção idêntico ao que exibem os provetes instalados sobre os tabuleiros de pontes.

No que diz respeito ao ajuste do modelo de fluência é de referir mais uma vez a boa concordância entre os diversos coeficientes de ajuste encontrados, especialmente o $C4$ que ajusta o valor da fluência a longo prazo. Não obstante o carregamento tardio da BC (alguns meses após a betonagem) quando comparado com a idade do betão aquando da aplicação da carga nos provetes

compensadores em pontes (em regra alguns dias após a betonagem) o valor médio próximo da unidade obtido para a BC confirma a qualidade do modelo de fluência proposto no EC2.

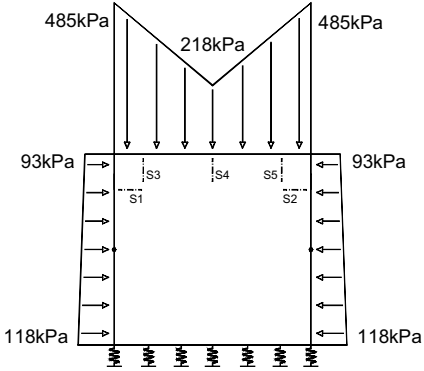
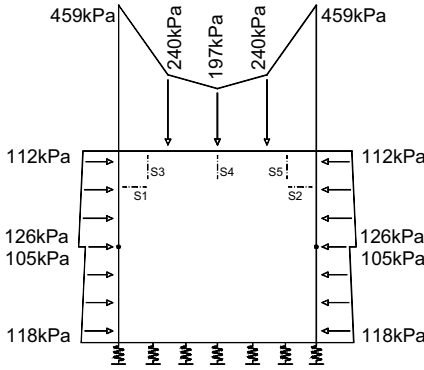
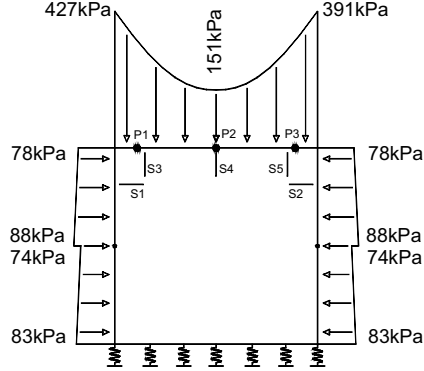
Para terminar refira-se que a determinação dos coeficientes de ajuste foi realizado para um período de observação de nove meses. Este período de tempo considera-se curto quando se pretende prever o comportamento da estrutura a longo prazo que no mínimo deverá ser de três anos para a retracção e de um ano para a fluência (Santos, 2001). Este facto inviabilizou inclusive a consideração do efeito sazonal da variação da temperatura nas medições efectuadas. Não obstante as limitações conhecidas do processo adoptado, obteve-se para o período em referência uma modelação correcta dos fenómenos da retracção e da fluência.

11.6.3 Avaliação das metodologias simplificadas de cálculo

Nas metodologias simplificadas de cálculo de estruturas enterradas de secção rectangular está subjacente um modelo de análise de estruturas reticuladas planas em que o solo de fundação é simulado através de apoios elásticos. Com o objectivo de avaliar este procedimento no cálculo dos esforços da estrutura, procede-se à comparação dos esforços calculados com os esforços obtidos a partir da medição para o caso da obra instrumentada.

Com base num programa de estruturas reticuladas planas procedeu-se a três cálculos distintos da BC em análise tendo sido possível obter para cada um deles os esforços axial e de flexão nos alinhamentos S1 a S5 da BC. As situações de carregamento consideradas estão resumidas no Quadro 11.9. Nos casos 1 e 2 aplica-se à estrutura em análise as metodologias simplificadas na avaliação da pressão do solo sobre a BC propostas por Cardoso (Cardoso, 1998) e por Sang (Sang, 2000), respectivamente. No terceiro cálculo é idealizada uma distribuição parabólica da pressão vertical determinada com base no valor médio da medição efectuada em obra durante o mês de Agosto com as células de pressão. Para diagrama de pressões horizontais adopta-se a distribuição indicada por Sang (Sang, 2000) mas limitando os valores propostos nesta metodologia a 70%. Embora a instrumentação efectuada não permita definir com segurança a forma do diagrama de impulsos a adoptar, esta redução justifica-se pelo facto da célula de pressão PC4 que mede os impulsos no montante direito ter apresentado ao longo do tempo sistematicamente valores inferiores aos estimados pelas metodologias simplificadas (ver Quadro 11.5).

Quadro 11.9 — Casos de carga considerados na estrutura porticada.

Caso de carga	Esquema da distribuição de pressão
<p>1 — (Cardoso, 1998)</p>	
<p>2 — (Sang, 2000)</p>	
<p>3 — Aproximação de uma parábola às pressões medidas:</p> <p>P1 – 362kPa; P2 – 151kPa; P3 – 331kPa.</p>	

O Quadro 11.10 apresenta os esforços axiais e de flexão calculados para cada um dos três casos de carga, referidos aos alinhamentos instrumentados, e os correspondentes valores obtidos a partir das extensões médias observadas durante o mesmo mês de Agosto.

Quadro 11.10 — Esforços normais e de flexão nos alinhamentos S1 a S5.

Caso de carga	Montantes				Travessa					
	S1		S2		S3		S4		S5	
	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
1	-380	-49	-380	-46	-112	+37	-112	+118	-112	+37
2	-307	-46	-307	-43	-122	+19	-122	+82	-122	+19
3	-268	-33	-258	-36	-88	+24	-88	+74	-88	+19
Medição	-280	-37	-220	-32	-66	+14	—	+75 (*)	-56	+14

(*) — Valor estimado com base na fendilhação observada.

A distribuição de pressão adoptada no caso de carga 1 (Cardoso, 1998) conduz a esforços axiais nos montantes e a momentos flectores na travessa bem superiores aos obtidos no caso de carga 2 (Sang, 2000) perseguindo a tendência já evidenciada anteriormente de o primeiro deles ser um método um pouco mais gravoso em termos de esforços para a estrutura quando comparado com o segundo.

Adoptando qualquer uma das metodologias simplificadas (casos de carga 1 e 2) obtêm-se esforços de um modo geral significativamente superiores aos obtidos quando se adopta o diagrama de pressões traçado com base na medição (caso de carga 3). Conforme foi já anteriormente referido as células de pressão têm experimentado ao longo do tempo uma evolução do valor medido determinada essencialmente pela evolução da temperatura. Os limites desta variação desde o início da observação da BC foram apresentados no Quadro 11.5. Para melhor se compreender as diferenças encontradas nos esforços dos alinhamentos da BC refira-se que os valores adoptados para definir o diagrama parabólico das pressões verticais no caso de carga 3 (ver Quadro 11.9) são uma média dos valores medidos durante o mês de Agosto e que de acordo com os dados experimentais disponíveis se verifica que correspondem a cerca de 90% da pressão vertical máxima medida (91% para PC1, 86% para PC2 e 88% para PC3). Este facto está em correspondência com a redução dos esforços verificados no caso de carga 3 quando comparados com os do caso de carga 2.

De um modo geral verifica-se uma boa concordância entre os valores dos esforços calculados no caso de carga 3 e os esforços obtidos a partir da medição das extensões. Confirma-se que o montante esquerdo que inclui o alinhamento S1 está sujeito a um esforço axial ligeiramente superior ao montante direito (alinhamento S2). Este facto é registado tanto pelas células de pressão como pelos extensómetros embebidos no betão. As diferenças encontradas nos alinhamentos S1 e S2 entre os esforços axiais calculados (caso de carga 3) e os medidos podem justificar-se pela utilização de um parábola passando pelos três pontos P1 a P3 que podem não ser suficientemente representativos da distribuição de pressão que actua sobre a BC mas podem também resultar da localização dos alinhamentos S1 e S2. Com efeito, a localização destes alinhamentos numa zona muito próxima da inserção do montante na travessa foi determinada com o objectivo de se obter, além do esforço axial, o valor máximo ou próximo do máximo do momento flector no montante. Mas dada a proximidade do esquadro de reforço que a BC tem nesta zona, a localização dos alinhamentos instrumentados tem como óbices a dificuldade em definir com rigor a espessura do elemento e a existência e um importante gradiente de deformações do qual se avalia um valor médio. Daí se justificar as diferenças encontradas, tanto para o esforço axial como para o de flexão, por excesso num dos casos (alinhamento S1) e por defeito noutro (alinhamento S2).

O esforço axial nos alinhamentos S3 e S5 obtido a partir da medição dos extensómetros é sensivelmente inferior ao calculado no caso de carga 3. O esforço axial da travessa está directamente relacionado com os impulsos transmitidos pelo solo à BC. Não obstante o diagrama de impulsos utilizado no caso de carga 3, cujos valores correspondem a 70% dos preconizados por uma das metodologias simplificadas de cálculo (Sang, 2000), o esforço axial medido denuncia que uma redução ainda mais expressiva dos impulsos pode ser adoptada.

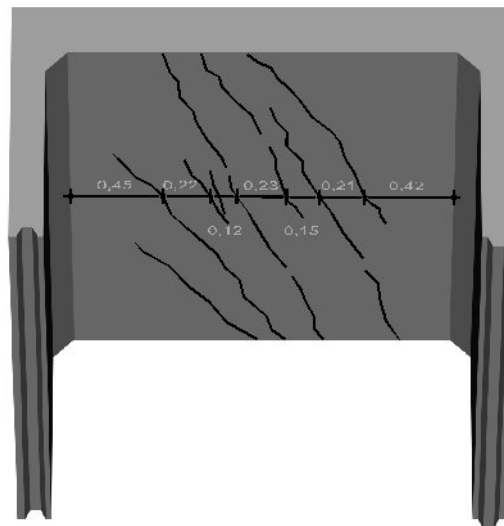


Figura 11.23 — Fendilhação na travessa da BC instrumentada.

No que diz respeito à obtenção dos esforços a partir da medição das extensões no alinhamento S4 da travessa é conveniente referir que a zona central da travessa se apresenta profusamente fendilhada, com fendas cujo espaçamento que varia entre 12cm e 24cm e com aberturas que variam entre 0,15mm e 0,20mm. A Figura 11.23 apresenta uma vista do tecto da BC onde foi realçada a fendilhação existente.

Em secção fendilhada a posição do plano neutro varia consoante se encontra sobre uma fenda ou entre fendas. Concomitantemente variam os encurtamentos do betão comprimido. Como os extensómetros utilizados têm um comprimento da malha sensora de 10cm o extensómetro instalado junto da face superior estará a medir um valor médio daquele encurtamento cuja localização exacta em relação à fendilhação existente se desconhece. Na zona do betão tracionado os alongamentos medidos apresentam dificuldade de interpretação acrescida. A determinação dos esforços a partir das extensões é neste caso um problema complexo e de difícil resolução principalmente tendo em atenção o número e o tipo de sensores utilizados. Com base na fendilhação verificada no local apenas se pode estimar o valor médio da tracção a que nesta zona as armaduras estão sujeitas. A extensão média das armaduras pode ser dada pela relação:

$$\varepsilon_{sm} = w_m / s_{rm} , \quad (11.22)$$

em que,

w_{sm} — é a largura média das fendas;

s_{rm} — é a distância média entre fendas.

Atendendo a que o valor médio da medição de largura de fendas foi de 0,15mm e que o seu espaçamento médio é de 19cm obtém-se:

$$\varepsilon_{sm} = 0,79 \times 10^{-3} . \quad (11.23)$$

O valor médio do esforço de tracção nas armaduras será então dado por:

$$N_{sm} = E_s \varepsilon_s A_s = 200 \times 10^6 \times 0,79 \times 10^{-3} \times 16,90 \times 10^{-4} = 267 \text{ kN} / \text{m} . \quad (11.24)$$

Sendo A_{ct} a área de betão na zona tracionada, o valor médio da tracção no betão pode ser estimado a partir do MC90 através da expressão:

$$N_{cm} \cong 0,6 f_{ctm} A_{ct} = 0,6 \times 2900 \times 0,075 = 130 \text{ kN} / \text{m} . \quad (11.25)$$

Para um braço do binário interno de forças de 90% da altura útil da travessa ($d=0,21\text{m}$), o momento flector actuante poderá ser dado por:

$$M = 0,9 d (N_{sm} + N_{cm}) = 0,9 \times 0,21 \times 397 = 75 \text{ kNm/m} . \quad (11.26)$$

Valor muito próximo do calculado no caso 3 de carga.

Em resumo pode concluir-se que o modelo desenvolvido para a obtenção de esforços em secções a partir das extensões medidas nos extensómetros de embeber no betão traduz correctamente os efeitos reológicos do betão, nomeadamente a maturidade do betão associada à evolução do módulo de elasticidade, a retracção e a fluência. Efectivamente não foi observada discrepância relevante entre os esforços calculados a partir deste modelo e os obtidos através da modelação numérica para uma acção idêntica (caso de carga 3). Este facto realça também que é correcta a modelação numérica da estrutura proposta nas metodologias simplificadas, associando-a a uma estrutura reticulada plana com apoios elásticos.

Por outro lado constata-se que a metodologia apresentada por Sang (Sang, 2000) propõe um modelo estrutural e um diagrama de pressões verticais que permite estimar com eficiência os esforços instalados neste tipo de estruturas sobrestimando apenas um pouco o valor dos impulsos que actuam sobre os montantes. Recorde-se que as diferenças encontradas entre os esforços obtidos a partir desta metodologia (caso de carga 2) e os obtidos a partir da medição com os extensómetros seriam substancialmente reduzidas caso se tivesse reportado os valores experimentais ao período em que a pressão medida foi máxima.

11.6.4 Evolução dos esforços na BC

A evolução da pressão do solo sobre a BC, de acordo com as medições efectuadas, está fortemente condicionada pelo efeito da variação da temperatura. Para ilustrar esta dependência repete-se na Figura 11.24 uma outra apresentada anteriormente (ver Figura 11.17) mas em que o período de observação foi ampliado até 18/11/2001.

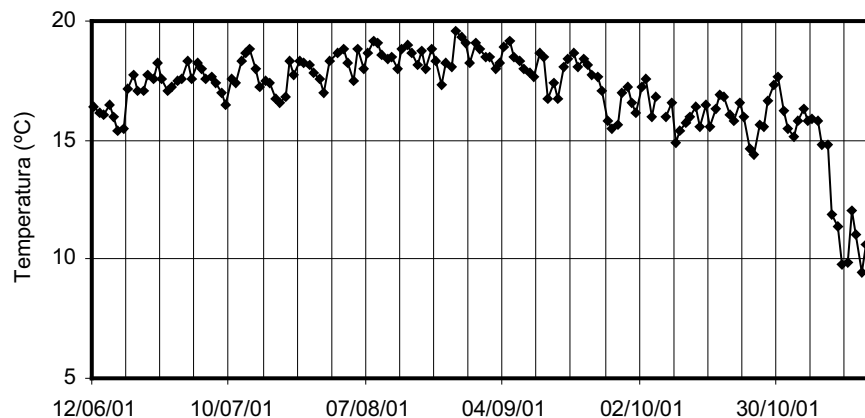


Figura 11.24 — Temperatura uniforme $(T_{amb.} + T_{aterro})/2$.

A Figura 11.25 apresenta a variação da temperatura diferencial para o mesmo período.

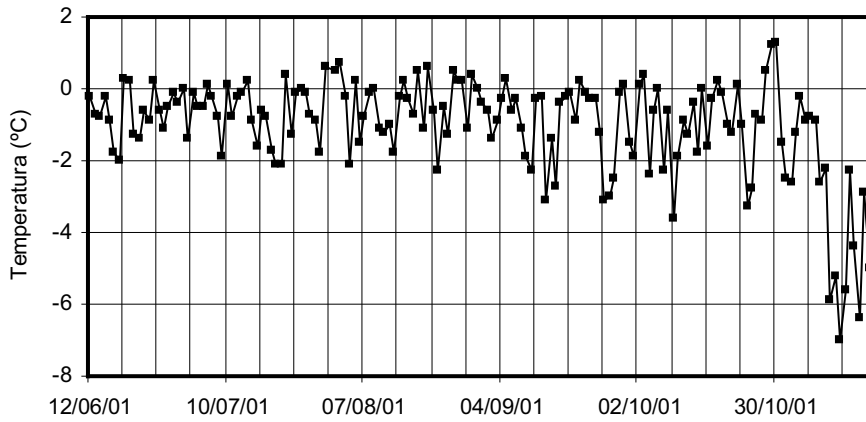


Figura 11.25 — Temperatura diferencial ($T_{amb.} - T_{aterro}$).

A evolução da pressão que o solo exerce sobre a BC, medida nas células de pressão no período em referência, está representada na Figura 11.26.

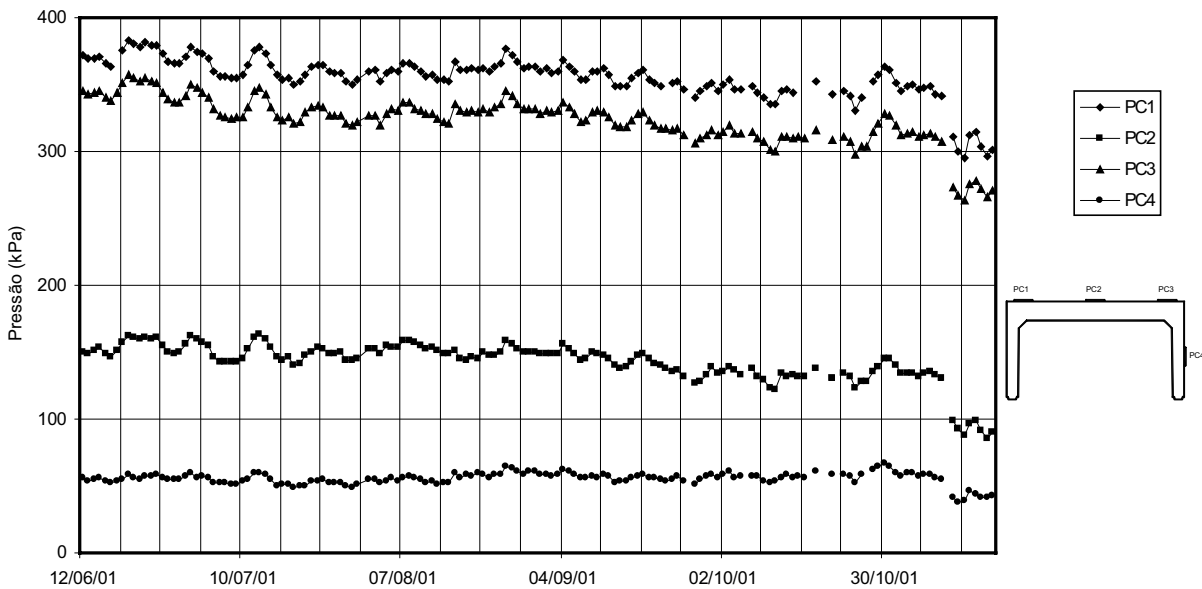


Figura 11.26 — Evolução do pressão medida.

Verifica-se que a pressão aumenta quando a temperatura uniforme aumenta e diminui quando a temperatura uniforme diminui. Esta relação não é contudo linear. Ou seja, não é possível estabelecer uma relação directa entre temperatura e pressão. Existem outros fenómenos envolvidos como a

fluência do betão que têm provocado a redução generalizada da pressão, mais evidente nas células que medem a pressão vertical. O encurtamento dos montantes por fluência pode ser uma das causas da redistribuição das pressões do bloco de aterro sobre a travessa da BC para os blocos que a ladeiam, fenómeno inverso ao descrito inicialmente (conferir com Figura 11.8).

Na Figura 11.27 representa-se a evolução do esforço axial dos alinhamentos instrumentados, a partir da medição efectuada com os extensómetros, com excepção do alinhamento S4, no período em referência. A Figura 11.28 apresenta a evolução do correspondente esforço de flexão. Verifica-se que, de um modo geral, os quatro alinhamentos em apreço exibem um mesmo comportamento ao longo do tempo mas pode concluir-se não haver relação directa entre a variação de pressão com a variação do esforço medido. Este facto é mais evidente nas últimas medições efectuadas em que se registou a diminuição simultânea das temperaturas uniforme e diferencial, a que correspondeu a diminuição das pressões e o aumento generalizado dos esforços axial e de flexão nos alinhamentos da BC.

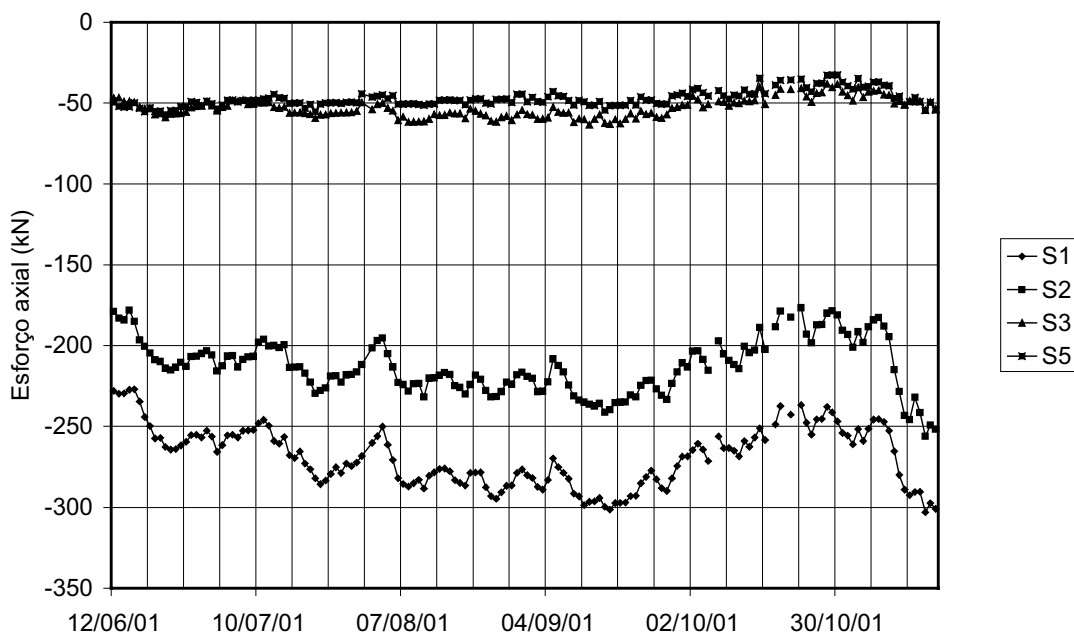


Figura 11.27 — Evolução do esforço axial em alinhamentos instrumentados.

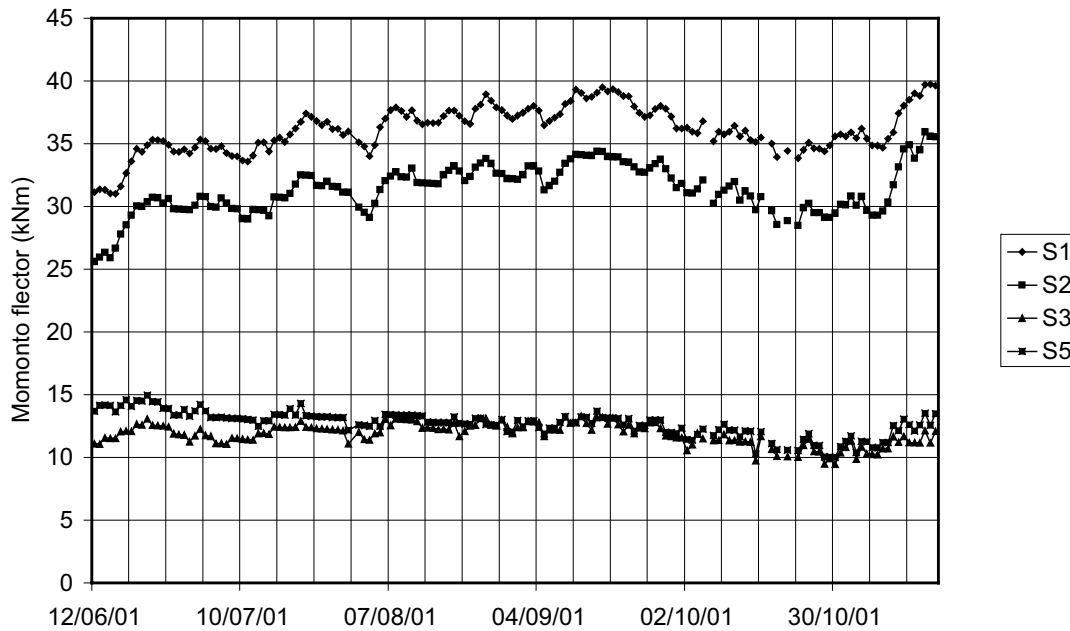


Figura 11.28 — Evolução do esforço de flexão em alinhamentos instrumentados.

11.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia de cálculo proposta por Sang (Sang, 2000) representa correctamente o comportamento da estrutura enterrada em apreço. A principal dificuldade detectada ao nível do projecto é a estimativa das características geotécnicas do material de aterro a executar em obra, nomeadamente o peso específico e o ângulo de atrito. A variabilidade destas grandezas pode rapidamente traduzir-se em erros na estimativa das pressões aplicadas à estrutura enterrada muito superiores àqueles que resultam da utilização das metodologias simplificadas de cálculo.

A temperatura tem um efeito não desprezável na pressão do solo sobre a BC e nos esforços a que a secção da BC fica sujeita. Recomenda-se por isso uma análise detalhada do efeito da variação uniforme e diferencial da temperatura sobre a estrutura com vista à determinação do mecanismo que origina a variação da pressão e a correspondente variação dos esforços na estrutura.

A análise do comportamento da BC com base em medições efectuadas em obra conduziu à necessidade de desenvolver um modelo para simular o comportamento dos materiais estruturais que a constituem, ajustado ao comportamento real da estrutura, que permite a obtenção de tensões e de esforços nos alinhamentos instrumentados com base na medição efectuada com extensómetros de embeber no betão. Uma evolução deste modelo deve incluir o efeito da variação sazonal da temperatura.

Em secções em que a fendilhação é mais importante verificaram-se dificuldades acrescidas na interpretação da medição efectuada não tendo sido adoptados os instrumentos de medida vocacionados para este fim. Nestes casos é importante medir a evolução da abertura de fendas desde a sua formação e o seu espaçamento. A distribuição de um importante conjunto de sensores à superfície na zona que se prevê que a fendilhação venha a ocorrer pode ser uma solução. Para o efeito podem ser instalados medidores de abertura de fendas (ver Figuras 5.6 e 5.23) posicionados em série, percorrendo toda a zona potencialmente afectada, garantindo-se deste modo que qualquer fenda que surja seja atravessada pelo menos por um destes sensores.

A análise do comportamento de estruturas com base em medições efectuadas em obra constitui um desafio cujo sucesso dependerá de inúmeros factores, de entre os quais se pode referir o sistema de monitorização adoptado e a sua aplicação em obra, a complexidade da estrutura em observação e os meios colocados à disposição quer em obra quer em laboratório.

O sistema de monitorização deve incluir os sensores, em quantidade e em qualidade apropriados ao fim a que se destinam, devendo ser dada especial atenção à localização dos alinhamentos instrumentados. A instrumentação de alinhamentos em zonas em que a grandeza que se pretende medir apresenta importantes variações conduz a resultados de mais difícil interpretação. Na observação de estruturas com elementos de pequena espessura (a BC tem alinhamentos instrumentados com 0,16m de espessura) é muito importante uma definição muito precisa da localização dos sensores.

O sistema de aquisição deve ser de qualidade e resistente às condições ambientais a que vai estar exposto. Zonas muito húmidas podem provocar interferências na medição, especialmente quando se trata da medição com extensómetros de resistência eléctrica.

CAPÍTULO 12

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho que agora se conclui constitui uma contribuição para o conhecimento dos sistemas de medição aplicados à observação e à monitorização do comportamento de estruturas na área da engenharia civil. Julga-se neste momento oportuno tecer algumas considerações finais relativas ao trabalho desenvolvido e apontar eventuais futuros desenvolvimentos sobre aspectos que, por ultrapassarem o âmbito desta dissertação, não são aqui explanados.

Procedeu-se à introdução do conceito de monitorização estrutural, tendo sido realçadas as potencialidades destes sistemas na análise do comportamento de estruturas, com especial incidência nas estruturas de betão.

A aplicação de sistemas de monitorização a estruturas de betão tem como principais objectivos:

- a) O conhecimento da evolução no tempo das deformações do betão. Esta informação é essencial para avaliar o efeito de cada uma das acções na contribuição para o valor final medido da extensão, com especial incidência sobre a caracterização das propriedades reológicas dos materiais estruturais.
- b) A medição simultânea e continuada de diversas grandezas relevantes para a definição do comportamento da estrutura, nomeadamente a medição da extensão, da inclinação e da força, entre outras. Assume especial importância a medição da extensão nos elementos estruturais e em provetes compensadores dos efeitos da retracção e da fluência do betão, a medição da temperatura nas secções instrumentadas com extensómetros e a medição das condições ambientais em que a estrutura se insere. Na caracterização das condições ambientais importa a medição da temperatura, da humidade relativa, da exposição solar e da pluviosidade. No caso de

estruturas pré-esforçadas e/ou atirantadas é ainda recomendável a medição em obra da evolução da tensão nos cabos de pré-esforço.

- c) Facilitar a interpretação dos resultados da medição efectuada durante os ensaios de carga usualmente efectuados em estruturas de maior dimensão. Os ensaios de carga são em geral conduzidos durante um período de tempo limitado. Contudo a sensibilidade das estruturas ao efeito da variação da temperatura, ainda que para pequenas variações, pode dificultar a interpretação e a análise dos resultados. O conhecimento da resposta da estrutura às variações de temperatura constitui uma ferramenta importante na interpretação dos resultados da medição.
- d) A monitorização estrutural constitui o único meio fiável de acompanhar e estimar o comportamento da estrutura durante a fase de exploração. Apresenta ainda a vantagem de suportar tecnicamente eventuais intervenções na estrutura, quer no domínio da reabilitação da reparação ou de reforço.

Na base de um sistema de monitorização estão os instrumentos de medida que, dada a sua importância neste contexto, justificam o desenvolvimento com que neste trabalho são referidos. É introduzida a terminologia associada à metrologia com vista a uma melhor caracterização dos sistemas de medição. Descreve-se então o princípio de funcionamento, e sempre que possível fornecem-se exemplos de aplicação dos transdutores actualmente mais utilizados na medição de diversas grandezas, como o deslocamento, a extensão, a temperatura, a pressão e a inclinação.

Do exposto, e com base na experiência na medição das grandezas descritas, podem realçar-se os seguintes aspectos:

- a) Os transdutores mecânicos podem ser de muito elevada precisão, e em aplicações laboratoriais ou quando se pretende a medição discreta de uma dada grandeza podem constituir uma boa solução, do ponto de vista de economia, facilidade de utilização e sobretudo da fiabilidade.
- b) A utilização de transdutores eléctricos, desde que devidamente instalados, permite obter informação da maior importância sobre o comportamento estrutural. Este facto resulta essencialmente de viabilizarem a medição contínua das grandezas para os quais estão vocacionados.
- c) A medição dos alongamentos no betão com extensómetros é de difícil condução. As dificuldades são acrescidas quando o betão atinge a fase fendilhada e os extensómetros estão embebidos na massa de betão. A medição da extensão do betão à superfície deve ser evitada sempre que possível, e usada apenas em situações de recurso, pois não é suficientemente reveladora do estado de deformação da massa de betão.

- d) A utilização de transdutores de deslocamento com vista à obtenção da extensão do betão pode ser uma excelente opção no caso de secções sujeitas à tracção. Sendo ideais em aplicações laboratoriais, apresentam em obra o inconveniente de ficarem demasiado expostos à agressividade do meio.

Deste trabalho pode concluir-se que os sistemas de monitorização a instalar em obra deverão ser robustos, fiáveis e de funcionamento autónomo, com capacidade de programação e de armazenamento de informação. Além disso deverão incluir um conjunto de acessórios, de entre os quais se salienta o sistema de alimentação de todo o sistema, incluindo a alimentação dos próprios sensores, e serem dotados de um sistema de comunicação. Em muitos casos é conveniente a instalação de um sistema de comunicação remota via modem, utilizando-se a rede fixa ou a rede GSM de comunicação.

Da experiência decorrente da aplicação de sistemas de monitorização a casos concretos de obras podem ser tecidas as seguintes considerações:

- a) Reveste-se de crucial importância o conhecimento prévio do comportamento estrutural previsto para a obra a instrumentar com o objectivo de definir o Plano de Monitorização. Tal plano deverá ser elaborado em colaboração estreita com o projectista.
- b) As opções a tomar aquando da definição do Plano de Monitorização deverão ser baseadas no tipo de grandezas a medir, na gama de medição, no número e localização das secções a instrumentar e nas condições locais da obra, em particular deve ser tida em atenção a exequibilidade de aplicação em obra das soluções previstas.
- c) Os prazos definidos para a instalação em obra dos equipamentos, desde sensores até ao próprio sistema de aquisição, são em geral um problema. Estes prazos são ditados pelo andamento da obra e por vezes não se integram facilmente no Plano de Monitorização inicialmente definido. Para o efeito é importante a sensibilização das diversas entidades envolvidas para o tempo que é necessário dispendir em laboratório em trabalhos preparatórios antes de se avançar para a instalação em obra.
- d) A necessidade de medição de uma nova grandeza obriga à pesquisa e selecção do instrumento de medida apropriado e muitas vezes à sua aquisição. Surge então a necessidade de desenvolver um conjunto de tarefas de calibração e de integração no sistema de monitorização. Nestes casos deve ser definido um prazo de tempo mais dilatado para a colocação desse transdutor em obra.
- e) Sempre que possível deve ser usada redundância quer na quantidade de sensores instalados, quer na de secções e de elementos instrumentados, ou mesmo na de canais de leitura

disponíveis no sistema de aquisição. Devem-se prever ainda soluções alternativas para os sistemas periféricos de alimentação e de comunicação.

- f) É da máxima importância a sensibilização das diversas entidades envolvidas na obra, incluindo o Dono da Obra, o Projectista, a Fiscalização e o Empreiteiro para os trabalhos a desenvolver em obra associados à instalação do sistema de monitorização, esclarecendo a utilidade de tais sistemas e quais os objectivos que pretendem alcançar. A integridade do sistema instalado depende frequentemente da informação do pessoal que na obra mais de perto dele lida com aquele.

A análise do comportamento estrutural com base na medição efectuada em obra constitui um desafio a que no presente trabalho apenas se faz uma breve referência. A modelação numérica das estruturas, e em particular a modelação do comportamento dos materiais com vista à interpretação dos valores obtidos experimentalmente, é um problema complexo que merecerá uma atenção especial em futuros desenvolvimentos. A incursão realizada nesta área permitiu desde já chamar a atenção para a necessidade de monitorização dos efeitos diferidos do betão.

Preconiza-se o desenvolvimento de um conjunto de software de tratamento de dados que congregue toda a informação proveniente da medição e que permita de modo eficiente proceder à sua interpretação. Nomeadamente com recurso à estatística como ferramenta de base e que incluam filtros que permitam parametrizar determinados efeitos de acções, como por exemplo, o efeito sazonal ou diário da temperatura. Do sucesso de tais sistemas de tratamento de informação dependerá a motivação das entidades com interesses e responsabilidades na área da segurança das estruturas para o uso mais generalizado dos sistemas de monitorização estrutural.

A finalizar não podem deixar de ser realçadas as vantagens da integração dos sensores de fibra óptica em sistemas de monitorização que muito em breve serão certamente de uso generalizado também na área das estruturas de engenharia civil. Esta tem sido e continuará a ser uma das prioridades do trabalho que na área da monitorização tem vindo a ser desenvolvido.

BIBLIOGRAFIA

AFA – Consultores de Engenharia, L.da; IDEAM – Projecto de Monitorização e de Ensaios Finais da Ponte. Porto, 1999.

ARDUINI, Marco [et al.] – New Applications of Fiber Optic Sensors for Structural Monitoring. IABSE Symposium. Structures for the Future – The Search for Quality. Rio de Janeiro, 1999. ISBN 3-85748-100-6. p. 491-498.

BASTOS, Ana M. S. – Experimentação como Metodologia de Interpretação do Comportamento de Estruturas de Betão. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, 1997.

BASTOS, Ana M. S. – Laboratório de Técnicas Experimentais e Observação de Obras. Técnicas Experimentais para Análise Estática de Estruturas. FEUP, 1999.

BERGMEISTER, K. e SANTA, U. – Global Monitoring Concepts for Bridges. Structural Concrete. ISSN 1464-4177, Vol. 2, n.º 1. (March, 2001), p. 29-39.

BRANCO, Fernando A. – Análise Experimental e Observação de Estruturas. CMEST, Universidade Técnica de Lisboa, 1990.

BRITO, Jorge; SANTOS, Sónia; BRANCO, Fernando A. – Inspeção e Manutenção de Obras de Arte em Portugal. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n.º 50 (Fev., 2002), p. 69-75.

BRITO, Jorge; BRANCO, Fernando A. – Sistemas de Gestão de Obras de Arte de Betão. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n.º 37 (Jun., 1994), p. 11-16.

CAMPILHO, Aurélio – Instrumentação Electrónica. Métodos e Técnicas de Medição. FEUP, 2000. ISBN 972-752-042-1.

CARDOSO, António Silva – Passagens Hidráulicas: Acções devidas ao Peso do Terreno. Nota Técnica. Maprel, 1998.

CHANG, Chia-Chen [et al.] – Measurement of Pavement Response with Buried Fiber Bragg Grating Based Soil Pressure Transducers. In SPIE. 14th International Conference on Optical Fiber Sensors, October, 2000. ISBN 0-8194-3848-0. p. 876-879.

COUTO, Paulo Martins – Metrologia Dimensional. Curso de Especialização em Instrumentação e Técnicas de Medida em Engenharia Mecânica. DEMEC, FEUP, 1989.

DALLY, James W.; RILEY, William F. – Experimental Stress Analysis. McGraw-Hill Book Co., 1991. ISBN 0-07-015218-7.

DAVIS, M. A. [et al.] – Dynamic Strain Monitoring of an In-Use Interstate Bridge using Fiber Bragg Grating Sensors. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Smart Structures and Materials 1997: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways. Vol. 3043, San Diego, California, USA. ISBN 0-8194-2456-0. (1997), p. 87-95.

EC2 – Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão - Parte 1.1: Regras Gerais e Regras para Edifícios. CEN, 1998.

FÉLIX, C. [et al.] – Aplicações de Sensores de Bragg em Fibra Óptica na Área das Estruturas de Engenharia Civil. Encontro Nacional Betão Estrutural, FEUP, Nov., 2000. ISBN 972-752-043-X. p. 515-524.

FÉLIX, C.; SANG, P. S.; FIGUEIRAS, J. A. – Observação do Comportamento de Box-Culvert Constituindo Passagens Hidráulicas. Relatório Técnico, Laboratório de Estruturas, FEUP, 1999.

FÉLIX, C; Figueiras, J. A. – Observação Laboratorial do Comportamento de um Sensor de Fibras Ópticas. Relatório Interno do Laboratório de Estruturas, FEUP, Nov., 1999.

FIGUEIRAS, J. A.; FÉLIX, C. – Monitorização de uma Box-Culvert Durante a Construção. Relatório Preliminar de Observação, Laboratório de Estruturas, FEUP, 2001.

FIGUEIRAS, J. A.; FÉLIX, C. – Monitorização do Viaduto sobre a VCI no Porto. Relatório Sumário de Observação, Laboratório de Estruturas, FEUP, 2001.

FINK, Donald G.; CHRISTIANSEN, Donald – Electronics Engineers' Handbook. McGraw-Hill Book Co., 1982. ISBN 0-07-020982-2.

FONSECA A. A. [et al.]. (a) – Ponte Infante D. Henrique, Dimensionamento Estrutural. Encontro Nacional Betão Estrutural, FEUP, Nov., 2000. ISBN 972-752-043-X. p. 857-877.

FONSECA A. A. [et al.] (b) – Ponte Infante D. Henrique, Processo Construtivo. Encontro Nacional Betão Estrutural, FEUP, Nov., 2000. ISBN 972-752-043-X. p. 857-877.

FREITAS, F. – Curso de Instrumentação. Técnicas de Medida em Engenharia Civil. FEUP, 1988.

GARCIA, Maria Teresa – Retracção e Fluência do Betão Observadas In Situ. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Novembro de 1995. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas.

HILL [et al.] – Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. Applied Physics Letters, 32. Vol 3 (1978), p. 647-649.

INAUDI, Daniele; CASANOVA, Nicoletta; VURPILLOT, Samuel – Bridge Deformation Monitoring with Fiber Optic Sensors. IABSE Symposium. Structures for the Future – The Search for Quality. Rio de Janeiro, 1999. ISBN 3-85748-100-6. p. 475-482.

INAUDI, Daniele; VURPILLOT, Samuel; CASANOVA, Nicoletta – Bridge Monitoring by Interferometric Deformation Sensors. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Fiber Optic Sensors, Beijing, China. ISBN 0-8194-2296-7. Vol 2895 (1996), p. 34-45.

JOHNSON, Curtis D. – Controlo de Processos: Tecnologia da Instrumentação. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1990. ISBN 972-31-0494-6.

KALAMKAROV, A. L. – On the Processing and Testing of Smart Composite Reinforcements. Proceedings of ECCM-8, European Conference on Composite Materials. ISBN 1-85573-377-3. Vol. 3 (1998), p. 341-348.

KENLEY, Mike; WOOD, Ray – Monitoring Bridge Performance. Bridge Design & Engineering, February, 1997.

KRONENBERG, Pascal; Casanova, Nicoletta; Inaudi, Daniele; Vurpillot, Samuel – Dam Monitoring with Fiber Optics Deformation Sensors. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Smart Structures and Materials 1997: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, San Diego, California, USA. ISBN 0-8194-2456-0. Vol. 3043 (1997), p. 2-11.

LONG, N. T.; VEZOLE, P. – Ouvrages sous Remblai pneusol et maîtrise des Charges Verticales: Conception / Dimensionement. ANNALES, 1993.

MAASKANT [et al.] – Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring. Cement & Concrete Composites. ISSN 0958-9465. Vol. 19. (1997), p. 21-33.

MAPREL – Departamento de Estruturas – Passagens Hidráulicas Rectangulares: Projectos de Execução. Maprel, 1998.

MARECOS, J. E. – Long Term Observation of Structures. Matériaux et Constructions, n.º 70 (1979), p. 321-327.

MARECOS, J. E.; CASTANHETA, M. N. – Observation and Testing of a Prestressed Bridge. Matériaux et Constructions, n.º 36 (1973).

MARECOS, J. E.; CASTANHETA, M. N. – The Observation of Tall Buildings. LNEC, 1971).

MARECOS, J. E.; FERNANDES, J. A. – Medium Term Observation of Shiprepair and Shipbuilding Docks. Matériaux et Constructions, Vol 11, n.º 66 (1978), p. 387-399.

MC90 – Model Code 1990. CEB-FIP. Comité Euro-International du Béton. London, Thomas Telford, 1993.

MEASUREMENTS GROUP, TN-501-2 – Noise Control in Strain Gage Measurements. USA (1992).

MEASUREMENTS GROUP, TN-504-1 – Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature. USA (1993).

MEASUREMENTS GROUP, TN-514 – Shunt Calibration of Strain Gage Instrumentation. USA (1988).

MOERMAN [et al.] – Monitoring of Concrete Structures with Integrated Bragg Grating Sensors. IABSE Symposium. Structures for the Future – The Search for Quality. Rio de Janeiro, 1999. ISBN 3-85748-100-6. p. 499-506.

PALLAS-ARENY, R.; WEBSTER, John G. – Sensors and signal conditioning. John Wiley & Sons, Inc., 1991. ISBN 0-471-54565-1.

PEDRO, José O. – Monitoring In Structural Engineering. New Applications of Computer Technologies. In International Conference New Technologies in Structural Engineering. Lisboa, 1997. ISBN 972-49-1740-1.

RESTIVO, Maria T. – Curso de Instrumentação e Medida. FEUP, 1995.

RESTIVO, Maria T. – Instrumentação e Medida: Medições de Temperatura. Secção de Automação Instrumentação e Controlo, DEMEGI – FEUP, 1994.

RIZKALLA, Sami; SHEHATA, Emile – Monitoring of Highway Bridge Reinforced and Prestressed with CFRP. IABSE Symposium. Structures for the Future – The Search for Quality. Rio de Janeiro, 1999. ISBN 3-85748-100-6. p. 499-506.

ROCHA, Manuel; BORGES, J. Ferry; MARECOS, José – Observation of Some Reinforced Concrete Structures. Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais sur les Matériaux et les Constructions, Symposium sur l'Observation des Ouvrages, LNEC, Outubro de 1955. p. 1-25.

SANG, P. S.; LOPES, P.; CARDOSO, A. S.; FIGUEIRAS, J. A. – A Problemática do Cálculo de Estruturas Enterradas Pré-fabricadas – O Caso Particular dos Box-Culvert. 1º Congresso Nacional da Indústria de Pré-Fabricação em Betão, Porto, Junho, 2000. Vol. I, p. 311-319.

SANG, Pedro A. S. – Comportamento e Modelação Numérica de Estruturas Enterradas de Betão. FEUP, Julho de 2000. Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil.

SANTOS, C. Pina; FERNANDES, J. Almeida; SANTOS, L. Oliveira – Estudo do Comportamento Térmico de Tirantes. Pontes Atirantadas do Guadiana e do Arade, LNEC, 1993. ISBN 972-49-1582-4. p. 185-194.

SANTOS, L. Oliveira – Observação e Análise do Comportamento Diferido de Pontes de Betão. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, IST, 2001.

SANTOS, L. Oliveira; VIRTUOSO, Francisco; FERNANDES, J. Almeida – Caracterização da Variabilidade do Comportamento Diferido do Betão Observado In Situ. Encontro Nacional Betão Estrutural, FEUP. ISBN 972-752-043-X. (Nov., 2000), p. 551-560.

SANTOS, T. Oliveira; FERNANDES, J. Almeida – Observação a Longo Prazo das Pontes do Guadiana e do Arade – Instrumentação e medições efectuadas durante a construção. Pontes Atirantadas do Guadiana e do Arade, LNEC, 1993. ISBN 972-49-1582-4. p. 165-183.

SANTOS, Sónia; BRITO, Jorge – Inspeccionabilidade de Obras de Arte. Encontro Nacional Betão Estrutural, FEUP, Nov., 2000. ISBN 972-752-043-X., p. 525-532.

TEIXEIRA, José, RIO, Pedro – Maestru 1.0 — Medição e Análise de Estruturas — Manual do Utilizador. FEUP, DEEC, Abril de 1999.

TIMOSHENKO, S. – Theory of plates and shells. McGraw-Hill, New York.

TYLER, R. G. [et al.] – A vibrating wire soil pressure gauge. Tunnels & Tunnelling, Nov. 1976.

VAUGHAN, John – Application of B & K Equipment to Strain Measurements. Brüel & Kjær, 1975. ISBN 87-7355-08-6.