

PROCEDIMENTOS COM VISTA À MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS — TESTE DO SONAR E ENSAIO DA PONTE DO PINHÃO

RÉMY GUIMARÃES DE FARIA

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

Orientador: Professor Doutor Joaquim de Azevedo Figueiras

FEVEREIRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

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

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

Aos meus Pais

A minha vontade é forte, mas a minha disposição de obedecer-lhe é fraca.

Carlos Drummond de Andrade

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar expresso o meu profundo reconhecimento ao Professor Joaquim Figueiras orientador da dissertação e ao Engenheiro Bruno Costa co-orientador de facto, pela disponibilidade e dedicação com que acompanharam o meu trabalho, desempenhando um importante papel na criação de uma nova palavra no meu dicionário, “Monitorização”.

Ao engenheiro Carlos Rodrigues pela sua valiosa contribuição no estudo do Sonar

Aos técnicos de laboratório, Cláudio Ferraz e Paula Silva, agradeço o apoio à parte experimental do trabalho.

Não posso deixar de agradecer a todos os meus colegas de curso, em especial ao Nelson Carvalho, “Maior” (João Alves) e Pedro Rodrigues, pela ajuda e companheirismo.

Ao Salvador, André e Diogo, amigos que sempre estiveram presentes quando precisei.

A toda a minha família e em especial aos meus pais, a quem dedico este trabalho, pelo constante estímulo académico e pela dedicação exemplar ao longo da minha vida.

RESUMO

Na monitorização do comportamento das estruturas a medição das grandezas relevantes é realizada com recurso a sistemas que fazem parte integrante da estrutura. Na sua essência estes sistemas são constituídos por sensores, sistemas de aquisição, de processamento e de armazenamento de informação e sistemas de comunicação, com elevado grau de automação, versatilidade e flexibilidade. 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, as estruturas são dotadas de sensibilidade.

O presente trabalho desenvolve-se precisamente neste âmbito, sendo dedicado à instrumentação, à monitorização e à análise do comportamento de uma obra de arte.

A dissertação começa por apresentar uma descrição geral dos diferentes processos de medição na monitorização de estruturas, descrevendo os princípios de funcionamento como também as grandezas obtidas para os diferentes processos de medição. Sendo também elaborado um estudo mais aprofundado das capacidades de um sensor de medição, mais precisamente o Sonar, sensor que tem por objectivo o acompanhamento da infraescavação da fundação de pontes.

É também detalhada a experiência recolhida na monitorização de uma obra de arte, nomeadamente a Ponte do Pinhão, sobre o rio Douro no Pinhão. O comportamento da Ponte do Pinhão é discutido com base nos resultados obtidos ao longo de duas fases de ensaio de carga, cujo complemento com recurso a modelos numéricos de análise permitiu interpretar e validar as medições efectuadas, validando a eficácia dos sistemas de monitorização.

Os resultados obtidos evidenciam o elevado potencial dos sistemas de monitorização, e permitem afirmar convictamente que os sistemas de monitorização representam um meio essencial para observar e compreender o comportamento das estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Sonar, sensores, monitorização, comportamento estrutural, sistemas de aquisição, medições.

ABSTRACT

During the monitoring of structures the most relevant entities are measured with system devices that are integrated into the structure itself. Essentially these systems are constituted by sensors and devices for the acquisition, processing and storing the obtained information, as well as by automatic communication systems with high versatility and flexibility. Within this scope it is possible to state that, with the most recent monitoring systems, structures are capable of sensitivity.

The present work is centred on the field of monitoring, namely on using of many instrumentation devices and monitoring of one bridge.

The thesis starts with an overall presentation of different processes of measurement available for structural monitoring, describing the beginning of functioning as also the obtain the bigness for the different process of measurement. Doing also an elaborated and deepen study of capacities of a sensors of measurement, known as “Sonar” whose objective is monitoring of Scour of foundation bridges.

The experience obtained during the monitoring of “Ponte do Pinhão”. The behaviour of “Ponte do Pinhão”, is discussed on the basis of the results obtained during the monitoring, which thereafter on compared to the predictions from numerical models in order to assess the predictions from numerical models in order to assess the efficiency of the developed monitoring systems.

The obtained results put into evidence the high potential of the monitoring systems, and allow to firmly state that such systems constitute an essential tool for observing and understanding the behaviour of structures.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais	9
1.2. Situação em Portugal	10
1.3. Objectivos e Organização da Dissertação	15

2. PROCESSOS DE MEDIÇÃO NA MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

2.1. Introdução	17
2.2. Medição de Deslocamentos	18
2.2.1. LVDT	18
2.2.2. Comparador eléctrico	18
2.2.3. Sensor de Pressão	19
2.3. Medição das Extensões	20
2.3.1. Extensómetros	21
2.3.2. Instalação dos Transdutores	21
2.4. Medição de Rotação	25
2.5. Medição de Temperatura	26

3. MEDIÇÃO DE INFRAESCAVAÇÃO – SONAR

3.1. Introdução	29
3.2. Sistema de Vigilância	31
3.2.1. Sonda	31
3.2.2. Anel Magnético Deslizante	32
3.2.3. Sonar	33
3.2.4. Sensor Enterrado	34
3.2.5. Outros Dispositivos	35
3.2.6. Conclusão	35
3.3. Sonar	36
3.4. Ensaios	37
3.4.1. Introdução	37
3.4.2. Ensaios em Laboratório	38
3.4.2.1. Variação da Temperatura da Água	38
3.4.2.2. Variação da Percentagem de Salinidade da Água	45
3.4.2.3. Variação da Turvação da Água	53

3.4.3. Ensaio em Ambiente Fluvial	57
3.5 Considerações Finais.....	59

4. MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA PONTE DO PINHÃO

4.1 Introdução.....	61
4.2 Introdução Histórica.....	62
4.3 SISTEMA ESTRUTURAL DA PONTE DO PINHÃO	63
4.4 Sistema de Medição.....	69
4.4.1 Introdução	69
4.4.2 Medição das Extensões	69
4.4.2.1 Extensómetros Utilizados	69
4.4.2.2 Localização e Ilustração dos Extensómetros Instalados em Obra	69
4.4.3 Medição dos Deslocamentos Verticais	82
4.4.3.1 Sensores de Pressão	82
4.4.3.2 Localização e Ilustração dos sensores de pressão	82
4.4.3.3 Comparador Eléctrico	85
4.4.3.4 Localização e Ilustração do comparador Eléctrico	85
4.4.3.5 LVDT	86
4.4.3.6 Localização e Ilustração do comparador Eléctrico	86
4.4.4 Medição dos Deslocamentos Horizontais	87
4.4.4.1 Localização e Ilustração dos LVDT's na Primeira Fase do ensaio de Carga	87
4.4.4.2 Localização e Ilustração dos LVDT's na Segunda Fase do ensaio de Carga	888
4.4.5 Medição e inclinações	90
4.4.5.1 Localização e Ilustração dos Inclínómetros na Primeira Fase do ensaio de Carga .	90
4.4.5.2 Localização e Ilustração dos Inclínómetros na Segunda Fase do ensaio de Carga .	90
4.4.6 Medição da Temperatura	92
4.4.6.1 Localização e Ilustração dos Sensores de Temperatura.....	92
4.4.7 Sistema de Aquisição	98
4.5 Ensaio de Carga	100
4.5.1 Primeira Fase do ensaio de Carga	100
4.5.1.1 Veículos Utilizados	100
4.5.1.2 Casos de Carga.....	102
4.5.1.3 Condução do ensaio	104
4.5.1.4 Resultados das Medições	105
4.5.2 Segunda Fase do Ensaio de Carga.....	113
4.5.2.1 Veículos Utilizados	113
4.5.2.2 Casos de Carga.....	114
4.5.1.3 Condução do ensaio	117
4.5.2.4 Resultados das Medições	118
4.6 Validação do Modelo Numérico de Analise	123
4.6.1 Introdução	123
4.6.2 Modelo de Analise	123
4.6.3 Interpretação de Resultados da Analise Numéricos.....	125
4.7 Considerações Finais.....	128

5. CONCLUSÃO

5.1. Conclusões	131
------------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO

Fig. 1.1 – Autoinfluençiógrafo mecânico-electrónico (Cardoso, 1968).	11
Fig. 1.2 - Fase da ripagem do cimbre da Ponte da Arrábida (Quintela e Proença, 2001).	12
Fig. 1.3 - Sistema óptico de medição de flechas (Marécos et al., 1969).	12
Fig. 1.4 - Viaduto Atirantado sobre a VCI no Porto.	13
Fig. 1.5 - Viaduto sobre a VCI na Nova Avenida Paralela à Avenida da Boavista, no Porto.	13
Fig. 1.6 - Ponte Eiffel em Viana do Castelo.	14
Fig. 1.7 - Ponte Luiz I.	14

2. PROCESSOS DE MEDIÇÃO NA MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Fig. 2.1 – Pormenor de um LVDT.	18
Fig. 2.2 – Pormenor do comparador eléctrico.	19
Fig. 2.3 – Princípio dos vasos comunicantes a um circuito hidráulico.	20
Fig. 2.4 – Esquema de ligação do sensor de pressão.	20
Fig. 2.5 – Aspecto básico de um extensómetro eléctrico.	21
Fig. 2.6 – Aspecto do extensómetro eléctrico.	22
Fig. 2.7 – Aspecto da superfície metálica rebarbada e limpa.	22
Fig. 2.8 – Colagem do transdutor.	23
Fig. 2.9 – Aplicação de pressão mecânica durante a colagem do transdutor.	23
Fig. 2.10 – Aplicação de pressão mecânica durante a colagem da protecção.	24
Fig. 2.11 - Aspecto geral da protecção antes da pintura da superfície metálica.	24
Fig. 2.12 - Aspecto final da aplicação de um transdutor.	25
Fig. 2.13 – Inclínómetro uniaxial.	26
Fig. 2.14 – Inclínómetro biaxial.	26
Fig. 2.15 - Exemplo de um sensor de temperatura PT100.	27
Fig. 2.16 - Encapsulamento do sensor de temperatura PT100.	27

3. MEDIÇÃO DE INFRAESCAVAÇÃO – SONAR

Fig. 3.1 – Tipo de acidente causado pela infraescavação.	29
Fig. 3.2 – Ponte antes do acidente.	30
Fig. 3.3 – Ponte depois do acidente.	30
Fig. 3.4 – Princípio da criação de uma infraescavação localizada.	31
Fig. 3.5 – Princípio do sistema de sonda.	32
Fig. 3.6 – Princípio de funcionamento do sistema de anel magnético deslizante.	32
Fig. 3.7 – Exemplo de uma instalação de um anel magnético deslizante.	33
Fig. 3.8 – Princípio de funcionamento e um Sonar.	33
Fig. 3.9 – Sonar marítimo.	34
Fig. 3.10 – Princípio de funcionamento do sensor enterrado.	34
Fig. 3.11 – Benthos PSA-916 Sonar Altimeter.	36
Fig. 3.12 – Datalogger DataTaker.	37
Fig. 3.13 - Velocidade do som em função da temperatura e da salinidade.	38
Fig. 3.14 – Metodologia para aquecer a água (banho-maria).	41
Fig. 3.15 – Visualização geral do ensaio.	41
Fig. 3.17 – Resultados teóricos do Sonar.	43
Fig. 3.21 - Velocidade do som em função da temperatura e da salinidade.	46
Fig. 3.22 – Representação do ensaio para medir o efeito da salinidade da água.	48
Fig. 3.23 – Evolução da salinidade durante o ensaio.	49
Fig. 3.29 – Comparação dos resultados do ponto2.	52
Fig. 3.31 – Ensaio em laboratório da turvação.	54
Fig. 3.32 – Amostras dos diferentes níveis de turvação.	54
Fig. 3.33 – Turbidímetro.	55

Fig. 3.35 – Comparação dos resultados do ponto1.	56
Fig. 3.38 – Local do caias de Vila Nova de Gaia onde foram efectuados os testes.	57
Fig. 3.39 – Procedimento do teste de profundidade em ambiente fluvial.	58
Fig. 3.40 – Pontos do cais em que se efectuaram as leituras.....	58
Fig. 3.42 - Velocidade do som em função da temperatura e da salinidade.	60

4. MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA PONTE DO PINHÃO

Fig. 4.1 – Vista geral da Ponte do Pinhão.	61
Fig. 4.2 – Vista da Ponte do Pinhão.	62
Fig. 4.3 – Ponte do Pinhão actualmente.	63
Fig. 4.4 – Ponte do Pinhão com indicações dos tramos e pilares.	64
Fig. 4.5 – Secção típica das longarinas.....	65
Fig. 4.6 – Secção típica das carlingas.....	65
Fig. 4.7 – Secção típica dos contraventamentos.	66
Fig. 4.8 – Secção típica das cordas inferiores.	66
Fig. 4.9 – Secção típica das cordas superiores.	67
Fig. 4.10 – Secção típica os montantes.	67
Fig. 4.11 – Secção típica das diagonais.....	68
Fig. 4.12 – Contraventamento superior.	68
Fig. 4.13 – Localização de montante e jusante.....	70
Fig. 4.14 - Extensómetros instalados nas secções S5, S8, S10, S13 a S16.....	70
Fig. 4.15 - Extensómetros instalados nas secções S7, S9.....	71
Fig. 4.16 - Extensómetros instalados nas secções S4.....	71
Fig. 4.17 - Extensómetros instalados nas secções S2.....	71
Fig. 4.18 - Extensómetros instalados nas secções S6 e de S9 a S12.....	72
Fig. 4.19 — Localização dos extensómetros instalados na secção S1 a S4.....	72
Fig. 4.19 — Ilustração dos extensómetros da secção S1 a S4.	72
Fig. 4.20 — Localização dos extensómetros instalados na secção S5.	73
Fig. 4.21 — Ilustração dos extensómetros da secção S5.	73
Fig. 4.22 — Localização dos extensómetros instalados na secção S6.	73
Fig. 4.23 — Ilustração dos extensómetros da secção S6.	74
Fig. 4.24 — Localização dos extensómetros instalados na secção S7.	74
Fig. 4.25 — Ilustração dos extensómetros da secção S7.	74
Fig. 4.26 — Localização dos extensómetros instalados na secção S8.	75
Fig. 4.27 — Ilustração dos extensómetros da secção S8.	75
Fig. 4.28 — Localização dos extensómetros instalados na secção S9.	75
Fig. 4.29 — Ilustração dos extensómetros da secção S9.	76
Fig. 4.31 — Ilustração dos extensómetros da secção S10.	76
Fig. 4.32 — Localização dos extensómetros instalados na secção S11.	77
Fig. 4.33 — Ilustração dos extensómetros e da caixa de ligação da secção S11.	77
Fig. 4.34 — Localização dos extensómetros instalados na secção S12.	78
Fig. 4.35 — Ilustração dos extensómetros da secção S12.	78
Fig. 4.36 — Localização dos extensómetros instalados na secção S13.	79
Fig. 4.37 — Ilustração dos extensómetros da secção S13.	79
Fig. 4.38 — Localização dos extensómetros instalados na secção S14.	79
Fig. 4.39 — Ilustração dos extensómetros da secção S14.	80
Fig. 4.40 — Localização dos extensómetros instalados na secção S15.	80
Fig. 4.41 — Ilustração dos extensómetros da secção S15.	80
Fig. 4.42 — Localização dos extensómetros instalados na secção S16.	81
Fig. 4.43 — Ilustração dos extensómetros da secção S16.	81
Fig. 4.44 - Localização dos diversos sensores de pressão instalados.	82
Fig. 4.45 - Ilustração dos sensores de pressão de referência DVT0S e DVT0N.....	83
Fig. 4.46 - Ilustração dos sensores de pressão DVT1J e DVT2J.	83
Fig. 4.47 - Ilustração dos sensores de pressão DVT3J e DVT1M.	84

Fig. 4.48 - Ilustração dos sensores de pressão DVT2M.....	84
Fig. 4.46- Localização do comparador eléctrico instalado.....	85
Fig. 4.47 - Ilustração do comparador eléctrico usado na primeira fase do ensaio de carga.....	85
Fig. 4.49 - Localização do LVDT para a medição da flecha a meio vão.....	86
Fig. 4.50 - Ilustração do LVDT usado na segunda fase do ensaio de carga.....	86
Fig. 4.51 - Localização dos LVDT's instalados no pilar P1.....	87
Fig. 4.52 - Ilustração do LVDT instalados a montante e a jusante.....	87
Fig. 4.53 – localização dos LVDT's instalados no pilar P1.....	88
Fig. 4.54 - Ilustração dos LVDT's no pilar P1 respectivamente montante e jusante.....	88
Fig. 4.55 – localização dos LVDT's instalados no pilar P2.....	89
Fig. 4.56 - Ilustração dos LVDT's no pilar P2 respectivamente montante e jusante.....	89
Fig. 4.57 - Localização dos LVDT's instalados no pilar P3.....	89
Fig. 4.58 - Ilustração dos LVDT's no pilar P3, respectivamente montante e jusante.....	90
Fig. 4.59 – Localização do inclinómetro instalado.....	90
Fig. 4.60 – Localização dos inclinómetros instalados na segunda fase do ensaio de carga.....	91
Fig. 4.61 - Ilustração do inclinómetro a meio vão.....	91
Fig. 4.62 - Ilustração do inclinómetro no encontro E1.....	91
Fig. 4.63 – Localização dos termómetros instalados a montante.....	92
Fig. 4.64 – Localização dos termómetros instalado a jusante.....	92
Fig. 4.65 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S1.....	93
Fig. 4.66 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S1.....	93
Fig. 4.67 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S2.....	93
Fig. 4.68 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S2.....	94
Fig. 4.69 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S3.....	94
Fig. 4.70 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S3.....	94
Fig. 4.71 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S4.....	95
Fig. 4.72 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S4.....	95
Fig. 4.73 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S7.....	95
Fig. 4.74 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S7.....	96
Fig. 4.75— Localização do sensor de temperatura instalado na secção S8.....	96
Fig. 4.76 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S8.....	96
Fig. 4.77 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S9.....	97
Fig. 4.78 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S9.....	97
Fig. 4.79 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S10.....	97
Fig. 4.80 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S10.....	98
Fig. 4.81 — Localização dos sistemas de aquisição.....	99
Fig. 4.82 — Ilustração do sistema de aquisição P01.....	99
Fig. 4.83 — Ilustração do sistema de aquisição P02.....	99
Fig. 4.84 — Ilustração do sistema de aquisição P03.....	100
Fig. 4.84 – Características do veículo tipo proposto para o ensaio.....	101
Fig. 4.85 – Caso de carga 1.....	102
Fig. 4.86 – Caso de carga 2.....	102
Fig. 4.87 – Caso de carga3.....	102
Fig. 4.88– Posição dos veículos na secção transversal do tabuleiro.....	103
Fig. 4.89 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 1.....	103
Fig. 4.90 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 2.....	103
Fig. 4.91 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 3.....	104
Fig. 4.92 – Flechas a meio-vão de cada tramo da ponte medidas com sensores de pressão.....	106
Fig. 4.93 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 3º Tramo medidos do lado de montante.....	106
Fig. 4.94 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 3º Tramo medidos do lado de jusante.....	107
Fig. 4.95 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 2º Tramo medidos do lado de montante.....	107
Fig. 4.96 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 2º Tramo medidos do lado de jusante.....	107
Fig. 4.97 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de montante.....	108
Fig. 4.98 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de jusante.....	108
Fig. 4.99 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de montante.....	108
Fig. 4.100 – Abertura da junta de dilatação localizada no 1º tramo sobre o pilar P1.....	109
Fig. 4.101 – Abertura da junta de dilatação localizada no 1º tramo sobre o pilar P1.....	109

Fig. 4.102 – Flechas a meio-vão de cada tramo da ponte medidas com sensores de pressão.	109
Fig. 4.103 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 3º Tramo medidos do lado de montante.	110
Fig. 4.104 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 3º Tramo medidos do lado de jusante.	110
Fig. 4.105 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 2º Tramo medidos do lado de montante.	110
Fig. 4.106 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 2º Tramo medidos do lado de jusante.	111
Fig. 4.107 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de montante.	111
Fig. 4.108 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de jusante.	111
Fig. 4.109 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de montante.	112
Fig. 4.110 – Abertura da junta de dilatação localizada no 1º tramo sobre o pilar P1 (montante).	112
Fig. 4.111 – Abertura da junta de dilatação localizada no 1º tramo sobre o pilar P1 (jusante).	112
Fig. 4.112 – Características do veículo tipo proposto para o ensaio.	113
Fig. 4.113 – Caso de carga 1.	114
Fig. 4.114 – Caso de carga 2.	114
Fig. 4.115 – Caso de carga 3.	115
Fig. 4.116 – Posição dos veículos na secção transversal do tabuleiro.	115
Fig. 4.117 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 1.	115
Fig. 4.118 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 2.	116
Fig. 4.119 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 3.	116
Fig. 4.120 – Extensões nas cordas inferiores em todos os tramos.	119
Fig. 4.121 – Extensões nas cordas superiores no 1º tramo.	119
Fig. 4.122 – Extensões nas diagonais no 1º tramo.	120
Fig. 4.123 – Extensões nos montantes no 1º tramo.	120
Fig. 4.124 – Extensões nas carlingas no 1º tramo.	121
Fig. 4.125 – Extensões nas cordas superiores no 1º tramo.	121
Fig. 4.126 – Temperatura obtida pelos diferentes sensores durante a realização do ensaio.	122
Fig. 4.127 - Rotações obtida pelos diferentes inclinómetros.	122
Fig. 4.128 – Perspectiva da estrutura simulada pelo modelo numérico.	123
Fig. 4.129 – Modelo numérico de um vão da estrutura da ponte.	124
Fig. 4.130 – Ilustração do ensaio.	124
Fig. 4.131 – Representação gráfica do diagrama tensão/extensão do aço da Ponte do Pinhão.	125
Fig. 4.132 – Deformação da estrutura para os casos de carga 1, 2 e 3.	126

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

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

Cada vez mais existe a necessidade de se construir novas estruturas, de maior dimensão e com exigências técnicas cada vez mais complexas, estruturas essas tais como pontes, barragens, túneis, edifícios em altura.

Os próprios sistemas de monitorização têm sido objecto de desenvolvimento. A monitorização do comportamento de estruturas tem contribuído para o aumento do conhecimento do comportamento dos materiais e das estruturas em condições de serviço e em situação em que se aproximam dos valores máximos previstos no projecto. Nos primeiros tempos a observação era quase exclusivamente qualitativa e resultava de simples observações visuais ou inspecções. Hoje estão difundidos sistemas e sensores baseados na electrónica e na opto-electrónica que sustentam o conceito de monitorização do comportamento das estruturas (Carlos Félix, 2004).

Adicionalmente, 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 clarificação do comportamento estrutural, a interpretação de medições efectuadas em obra e a detecção e identificação de danos.

A medição das grandezas na monitorização do comportamento das estruturas é realizada com recurso a sistemas que fazem parte integrante da estrutura, estes sistemas constituídos por sensores, sistemas 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.

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, para uma rede global de informação.

Uma das vantagens de uma estrutura dotada de um sistema de monitorização é a possibilidade de gerar sinais de alarme, quando determinados parâmetros pré-definidos 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 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 degradação dos materiais, o seu comportamento reológico e os efeitos da adopção de um determinado processo construtivo.

Este estudo assume maior relevância nas situações em que são adoptados novos materiais, e 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, os sistemas de monitorização têm sido largamente utilizados na aferição de normas regulamentares e de modelos teóricos de análise e na observação de comportamentos difíceis de simular em laboratório.

1.2. SITUAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal o Prof. Edgar Cardoso foi um projectista exemplar que viu nas técnicas de observação do comportamento das estruturas uma fonte de ensinamentos e contribuiu imenso para o desenvolvimento das técnicas e sistemas de observação do comportamento estrutural.

Numa época em que se assistia ao desenvolvimento dos computadores, Edgar Cardoso adoptou, pode dizer desde o início da sua longa carreira, a utilização sistemática e o desenvolvimento das tecnologias de verificação da estabilidade pela via experimental. Ou seja, através da análise dos esforços e deformações produzidas em modelos reduzidos por sobrecargas que simulavam adequadamente as solicitações previstas para as obras a realizar.

Edgar Cardoso defendia que os modelos reduzidos podiam aproximar-se da realidade tanto quanto se quisesse, pelo menos em regime elástico, existindo técnicas e aparelhagem que permitiam, em breves segundos, registar os sucessivos estados de tensão ou de deformação em qualquer fibra do modelo, o que não era viável pela via matemática (Quintela e Proença, 2001).

Mas foi também na área das técnicas e da aparelhagem em si mesmas que o Professor aplicou toda a sua ilimitada capacidade inventiva, servida por uma sábia componente de conhecimentos de electrotecnia e por uma habilidade de mãos verdadeiramente notável. Do seu laboratório foram nascendo, ano após ano, dezenas de aparelhos ali construídos, mecânicos ou electrónicos, muitos dos quais inovadores ou mesmo “revolucionários”.

De entre os numerosos inventos salientam-se o autoinfluenciógrafo (Fig 1.1), dispositivo mecânico-electrónico que permitia o traçado de linhas de influência de qualquer efeito num modelo de uma estrutura, os extensómetros de contacto que aplicava na observação de modelos reduzidos e os extensómetros para controlo de obras em verdadeira grandeza.

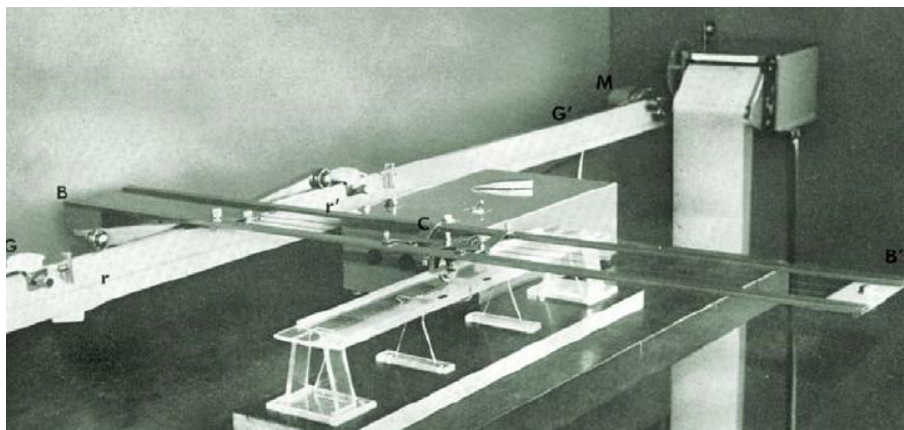


Fig. 1.1 – Autoinfluenciógrafo mecânico-electrónico (Cardoso, 1968).

Actualmente 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 referência não só a nível nacional mas também a nível mundial, tendo tido intervenções de vulto nos mais diversos países do mundo.

Desde a primeira estrutura importante observada, a Ponte sobre o Rio Sousa, em 1948 (Rocha, Borges e Marécos, 1955), até mais recentemente com a observação do Aeroporto de Santa Catarina no Funchal ou a Ponte Salgueiro Maia, em Santarém, o LNEC tem assimilado e difundido um conjunto ímpar de conhecimentos e de experiências, sobre o real comportamento estático e dinâmico de edifícios e pontes, que a simples aplicação das novas tecnologias não substitui. Para os trabalhos de campo projectou e construiu novos tipos de aparelhos, e desenvolveu técnicas de observação inovadoras que passaram a ser internacionalmente reconhecidas.

No domínio da observação das obras de arte, o LNEC tem sido solicitado a analisar o comportamento estrutural e avaliar as respectivas condições de segurança. Consoante a sua importância, assim o desenvolvimento dos trabalhos varia desde a simples realização de ensaios de carga até à observação a médio prazo, a qual habitualmente se inicia durante a construção e se prolonga por períodos da ordem dos 5 a 10 anos após a conclusão.

De entre a vasta lista de obras de arte observadas merecem ser recordados os trabalhos desenvolvidos na Ponte de Arrábida (Fig. 1.2), cujos estudos iniciais resultaram de um pedido do projectista, Prof. Edgar Cardoso. Nesta obra conseguiu-se pela primeira vez controlar a transferência dos esforços do cimbra, devidos ao peso próprio das aduelas de betão, para o próprio arco, quando este foi completado e o cimbra retirado (Marécos, 1963), tais observações foram realizadas com uma precisão bastante satisfatória, porquanto os desvios entre os valores medidos nas oito secções do arco e do cimbra e os previstos no projecto foram da ordem de 1%.



Fig. 1.2 - Fase da ripagem do cimbrio da Ponte da Arrábida (Quintela e Proença, 2001).

Outro trabalho de particular importância e envergadura consistiu na observação da ponte suspensa sobre o rio Tejo e dos seus viadutos de acesso. Esta observação permitiu a obtenção de resultados de inegável interesse para o conhecimento do comportamento deste tipo de estruturas. Foi a primeira grande ponte suspensa do mundo em que se procedeu à verificação do comportamento estrutural durante as fases de construção (Marécos et al., 1969). Após a sua conclusão foi sujeita a provas de carga com sobrecargas idênticas às previstas no projecto. A observação desta ponte permitiu ainda estabelecer correlações entre a acção do vento e a resposta dinâmica da estrutura. De entre a diversa instrumentação utilizada salienta-se o revolucionário sistema óptico de medição de flechas (fig. 1.3), especialmente desenvolvido pelo LNEC para esta obra.

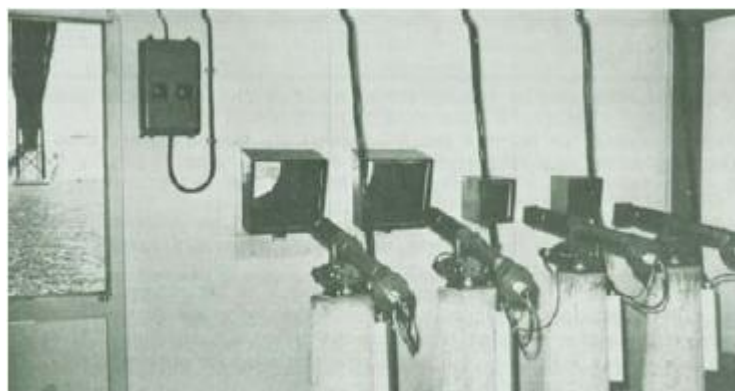


Fig. 1.3 - Sistema óptico de medição de flechas (Marécos et al., 1969).

Mais recentemente, além do LNEC 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 análise do comportamento de estruturas. Certo da importância que tais sistemas assumem na durabilidade e na segurança das estruturas, o LABEST – Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), tem desenvolvido e aplicado esta área de conhecimento a modelos laboratoriais e a estruturas reais, procurando responder às necessidades da indústria da construção e contribuir para a realização de estruturas mais seguras, mais económicas, e com a durabilidade assegurada com um mínimo de manutenção.

A realização de estruturas em escala reduzida, executadas e conservadas em laboratório em condições controladas de temperatura e de humidade, submetidas a acções conhecidas, permite testar e calibrar os sensores e todo o sistema de medição e apoiar a interpretação das leituras efectuadas em obra. Nas aplicações em estruturas reais o LABEST tem acompanhado a execução de obras que, pela sua singularidade, carecem de avaliação permanente durante o processo construtivo, como foi o caso do Viaduto Atirantado sobre a VCI no Porto (Fig. 1.4) (Félix e Figueiras, 2001).



Fig. 1.4 - Viaduto Atirantado sobre a VCI no Porto.

Tem procedido também à verificação da conformidade entre a estrutura executada e o modelo utilizado na fase de projecto através da condução de provas de carga. Durante a fase de exploração tem perseguido a avaliação permanente das condições de serviço e a prevenção do colapso estrutural. São exemplo destas intervenções, entre outros, os sistemas de monitorização instalados no Viaduto sobre a VCI na Nova Avenida Paralela à Avenida da Boavista, no Porto (Fig. 1.5), que permite acompanhar a evolução do estado de tensão em diversas secções da estrutura durante todo o processo construtivo.



Fig. 1.5 - Viaduto sobre a VCI na Nova Avenida Paralela à Avenida da Boavista, no Porto.

No que diz respeito à condução de provas de carga, destaca-se a observação do comportamento de um conjunto de pontes e viadutos ferroviários, como por exemplo na Ponte Eiffel em Viana do Castelo (Fig. 1.6), Ponte Luiz I (Fig. 1.7) (Félix e Figueiras, 2002).



Fig. 1.6 - Ponte Eiffel em Viana do Castelo.



Fig. 1.7 - Ponte Luiz I.

Cada vez mais se tem verificado uma maior sensibilização na questão de observação estrutural por parte das diversas entidades envolvidas na execução e na exploração de estruturas de Engenharia

Civil, nomeadamente, donos da obra, promotores e construtores, requerendo 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 e a Ponte de Lezíria, 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. Os materiais utilizados nestas realizações têm sido, preferencialmente, o betão e o aço. Por outro lado, aumenta o número de obras de arte que necessitam de ser sujeitas a trabalhos de reabilitação e reforço, adaptando-as às novas exigências funcionais e repondo as necessárias condições de segurança.

Nestas intervenções, a utilização conjunta de resultados experimentais, por via da aplicação de sistemas de monitorização, e de resultados previstos por via da modelação numérica, é de fundamental importância na aferição dos modelos que servem de base aos projectos e na interpretação e análise das medições efectuadas em obra.

É neste contexto que se desenvolve o presente trabalho, dedicado à instrumentação, à monitorização e à análise do comportamento de estruturas, assumindo especial desenvolvimento a sua aplicação numa obra de arte, precisamente a Ponte do Pinhão. A utilização de modelos numéricos de análise estrutural permite uma discussão complementar dos resultados experimentais obtidos.

Os principais objectivos que se procura alcançar com o desenvolvimento do presente trabalho, consistem em:

- Aprendizagem dos meios e dos procedimentos a utilizar com vista à observação e à monitorização de estruturas;
- Estudo e análise das condições de funcionamento e operacionalidade de um transdutor de aplicação recente à medição de infraescavação – o Sonar;
- Discussão e validação dos resultados experimentais com os resultados correspondentes da bibliografia (Sonar), ou com os resultados fornecidos por um modelo numérico (Ponte do Pinhão).

O trabalho desenvolve-se em cinco capítulos, o primeiro dos quais é a presente introdução, que faz um enquadramento geral do trabalho, a sua inserção no contexto nacional, e os principais objectivos que são perseguidos. No Capítulo 2 descrevem-se diferentes sistemas de monitorização existentes para análise estrutural, apresentando-se para os diferentes sistemas, os objectivos, o tratamento e apresentação dos resultados, e a interpretação e análise do comportamento estrutural. No Capítulo 3 descrevem-se os diferentes sistemas de vigilância para o fenómeno da infraescavação, e faz-se um estudo aprofundado de um dos sistemas de vigilância, mais propriamente dito, o Sonar. A técnica de medição da infraescavação com base no Sonar, trata-se de um sistema bastante recente, por isso existiu todo o interesse em estudar a sensibilidade e estabilidade na utilização deste mesmo sistema.

No âmbito do Projecto de reforço da Ponte do Pinhão, procedeu-se à sua instrumentação com vista à condução de dois ensaios de carga. Este caso de obra é explorado no Capítulo 4, onde se realçam as virtudes do sistema de monitorização instalado na avaliação do comportamento da ponte, e na validação e calibração do modelo numérico. Descreve-se o sistema de medição adoptado e os procedimentos associados à condução dos diferentes ensaios de carga, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos e o Capítulo 5 contendo as principais conclusões.

2

PROCESSOS DE MEDIÇÃO NA MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

2.1. INTRODUÇÃO

O processo de medição constitui, na sua 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.

Na observação de uma obra de arte distingue-se dois tipos de grandezas: grandezas caracterizadoras do comportamento da estrutura, como por exemplo flechas, rotações e deslocamento de aparelhos de apoio, e grandezas caracterizadoras do comportamento local da estrutura, como é o caso de tensões, extensões e aberturas de fendas.

Para além das grandezas mencionadas anteriormente, existem também grandezas que caracterizam as condições ambientais, tais como temperatura ambiental, a humidade relativa, a pluviosidade, a radiação solar e o vento. A temperatura ambiente é uma grandeza importante para a monitorização; para além de induzir deformações ou tensões na própria estrutura também afecta os próprios sensores, podendo falsear as medições. Este facto conduz também à conveniência de se instalar na estrutura termómetros em número suficiente para registo da respectiva distribuição, pelo menos nas secções instrumentadas.

Estas são algumas das medições que mais correntemente se efectuam na superestrutura. Embora menos usual, a medição de grandezas nas fundações, nomeadamente deslocamentos, deformações ou pressões, pode revelar-se de grande importância. Sempre que possível, a instalação de sensores na infraestrutura e a respectiva aquisição de sinal devem ter início com a construção, podendo neste caso servir como teste de carga à fundação.

Actualmente tem vindo a assumir cada vez maior importância a medição de grandezas caracterizadoras da durabilidade da estrutura, com especial destaque para a medição das que estão associadas à corrosão das armaduras.

Apresentam-se em seguida os processos de medição de grandezas que foram utilizados na observação do comportamento de estruturas, os quais são objecto de aplicação no caso da obra analisada no

âmbito do presente trabalho, a Ponte do Pinhão. As grandezas consideradas são o deslocamento, a extensão, a temperatura e a rotação.

2.2. MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS

Existe uma grande variedade de instrumentos destinados à medição de deslocamentos relativos entre dois pontos. No presente trabalho foram utilizados os seguintes instrumentos: LVDT's, comparador eléctrico e sensores de pressão.

2.2.1. LVDT

A medição de flechas e de abertura da junta foi obtida por meio de transdutores indutivos do tipo “LVDT”. Os LVDT's são dispositivos electromecânicos que medem deslocamentos ou movimentos relativos (Fig. 2.1) através de um sinal eléctrico de saída proporcional ao movimento de um núcleo magnético móvel, solidário com a estrutura. O sinal eléctrico emitido por este transdutor é condicionado e amplificado de modo a fornecer uma resposta instantânea ajustada às operações de medição. Nos LVDT's os efeitos da temperatura não são auto-compensado, mas a sua influência no resultado das medições é reduzida.

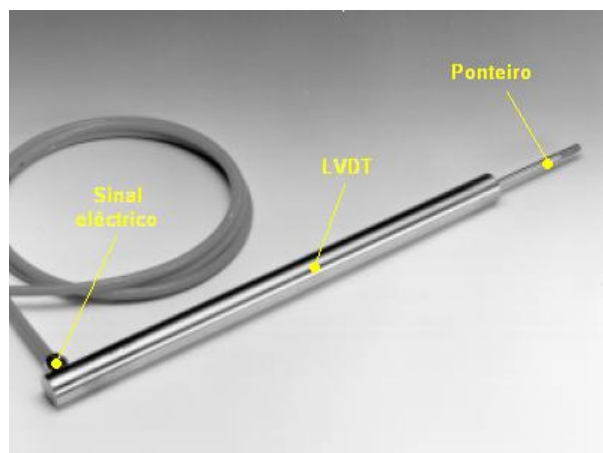


Fig. 2.1 – Pormenor de um LVDT.

2.2.2. COMPARADOR ELÉCTRICO

Os comparadores eléctricos são transdutores constituídos por um elemento elástico, geralmente construído em aço, cuja deformação, por flexão, produzida por actuação do deslocamento é medida por extensómetros eléctricos de resistência montados internamente em posições adequadas e convertida por calibração, no deslocamento aplicado (Figura 2.2). Este princípio de funcionamento do sensor possibilita pois, o registo automático das medições.

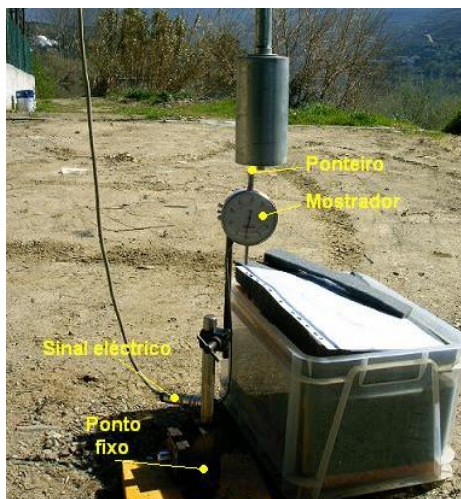


Fig.2.2 – Pormenor do comparador eléctrico.

O comparador eléctrico utilizado na ponte do Pinhão tem como campo de medição de 0 mm à 30 mm e sensibilidade de 100×10^{-6} /mm. A temperatura e humidade relativa ideais de funcionamento são respectivamente 23 °C e 65 %.

2.2.3. SENSOR DE PRESSÃO

Na medição dos deslocamentos verticais também foi utilizado um sistema de nivelamento hidrostático tradicionalmente utilizado pelo LNEC. O sistema consiste na aplicação do princípio dos vasos comunicantes a um circuito hidráulico com vários pontos de saída, conforme se esquematiza na Figura 2.3. Um dos pontos é considerado fixo, enquanto os restantes experimentam deslocamentos verticais idênticos aos da estrutura. Nos pontos que se deslocam verticalmente associa-se a variação de altura de líquido a uma variação de pressão.

Como a altura do líquido no ponto considerado fixo pode experimentar variações, a pressão nesse ponto é medida em simultâneo com a pressão nos pontos cujo deslocamento vertical se pretende medir, sendo o resultado da medição dado pela diferença de pressão entre um e outro ponto. O líquido geralmente utilizado é a água, reunindo algumas vantagens, nomeadamente, viscosidade reduzida o que permite a circulação rápida no circuito e daí respostas rápidas de todo o sistema, peso específico conhecido e é facilmente encontrado em obra. Outros líquidos podem ser adoptados, como o óleo, que por ter maior viscosidade permite o amortecimento de eventuais vibrações aplicadas ao circuito, e tem peso específico mais elevado, o que aumenta a sensibilidade do sistema.

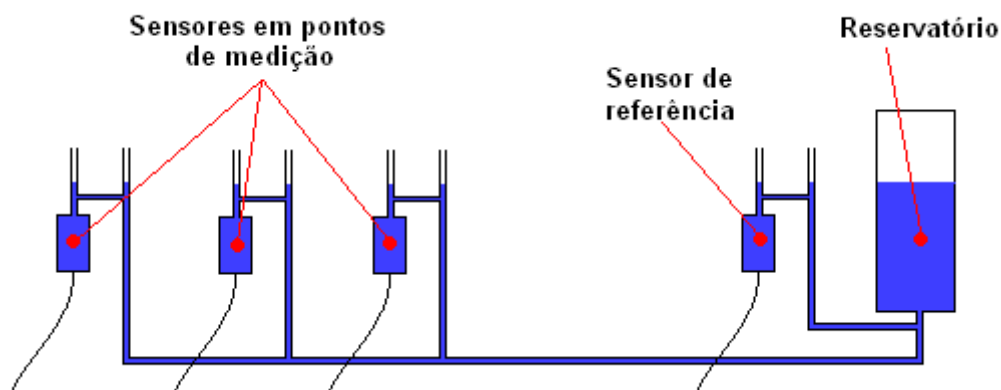


Fig 2.3 – Princípio dos vasos comunicantes a um circuito hidráulico.

Na Ponte do Pinhão procedeu-se à instalação de um circuito hidráulico constituído por dois reservatórios, fixados um em cada encontro (onde se considera desprezável o deslocamento vertical). Instalaram-se sensores de pressão em vários pontos, nos quais se pretendia medir deslocamentos verticais na estrutura e também juntos aos reservatórios para servirem de referência. O líquido utilizado foi água. A figura 2.4 apresenta alguns pormenores do sistema de medição instalado.

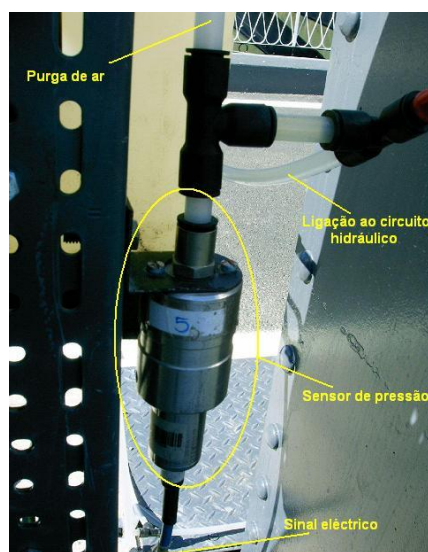


Fig.2.4 – Esquema de ligação do sensor de pressão.

2.3. MEDIÇÃO DAS EXTENSÕES

Os instrumentos de medida destinados à medição pontual da extensão são designados extensómetros, podendo ser de aplicação à superfície ou de embeber. Os primeiros estão especialmente indicados para 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 estruturas de betão, necessitando para

isso de serem instalados previamente à betonagem. Na observação da Ponte do Pinhão foram utilizados extensómetros de colar à superfície.

2.3.1. EXTENSÓMETROS

Para a medição de extensões em estruturas metálicas são colados transdutores à superfície do aço extensómetros de resistência eléctrica (e.g. 350ohm) ver Fig. 2.5. Os extensómetros eléctricos (*strain gages*) são dispositivos que convertem uma dada grandeza física não eléctrica (deformações) em grandezas eléctricas, isto é, o material que compõe o transdutor sofre uma variação da resistência de modo proporcional à deformação a que é sujeito, devido a pequenos deslocamentos ou deformações. O extensómetro, como o próprio nome diz, é um sensor de deformação mecânica localizada, colado no ponto de medida, e ligado electricamente a um circuito tipo ponte de *wheatstone*. O sinal eléctrico de saída está associado à variação da resistência eléctrica do extensómetros.

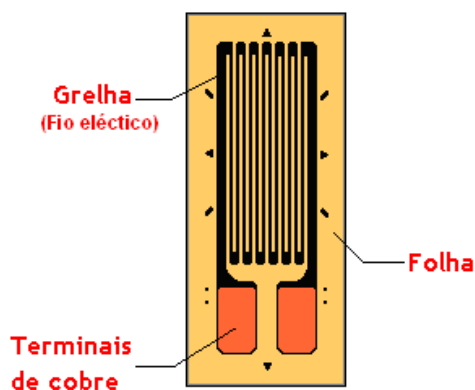


Fig. 2.5 – Aspecto básico de um extensómetro eléctrico.

A seguir serão relacionados os principais procedimentos usados na preparação e colagem dos extensómetros eléctricos em obra.

2.3.2. INSTALAÇÃO DOS TRANSDUTORES

De modo a garantir um bom encastramento do extensómetro na superfície das peças metálicas instrumentadas, os extensómetros foram preparados em laboratório numa primeira fase, inseridos numa base constituída por uma película muito fina de resina epóxida com cerca de 0,2 mm de espessura (Fig. 2.6)



Fig. 2.6 – Aspecto do extensómetro eléctrico.

A primeira tarefa a executar para a instalação dos sensores é a preparação da superfície. Esta operação começa com a remoção da camada de protecção do metal, recorrendo a meios mecânicos. A área de intervenção, ligeiramente superior à ocupada pelo sensor é delimitada por um marcador. De seguida, a tinta é removida com o auxílio de uma rebarbadora eléctrica equipada com discos de lixa granulados. A superfície metálica rebarbada é limpa de quaisquer vestígios de humidade e gordura com gazes ensopados, primeiro numa solução de limpeza ácida, condicionador, e depois numa solução de limpeza alcalina designada genericamente de neutralizador (Fig 2.7).



Fig.2.7 – Aspecto da superfície metálica rebarbada e limpa.

Depois de preparada a superfície metálica que vai acolher o sensor, uma película fina de resina epoxy com um tempo de presa de 5 minutos, é colocada na face de contacto para colagem do transdutor, como se representa na figura 2.8.

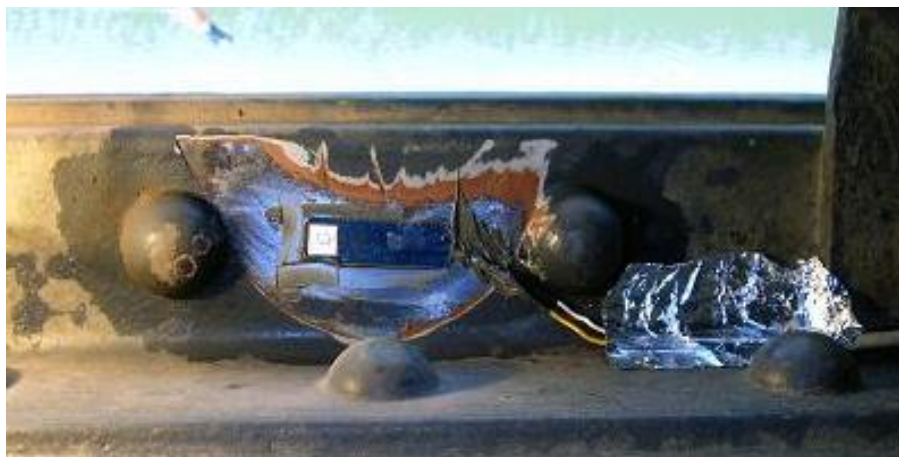


Fig. 2.8 – Colagem do transdutor.

Após o correcto alinhamento do extensómetro é aplicada pressão com a ajuda de um grampo ou outro dispositivo mecânico, se a geometria da secção assim o obrigar. De forma a proteger o transdutor durante esta delicada operação, uma tira de borracha de neoprene é colocada entre a lâmina de resina epóxida contendo o extensómetro e um taco de madeira, através do qual a força é transmitida, conforme se observa na figura 2.9. Este esquema permite a aplicação de uma pressão uniforme por todo o corpo do extensómetro, possibilitando a eliminação da cola em excesso na interface polímero/aço, assegurando uma fina camada de elemento adesivo. Este ponto é preponderante no mecanismo de transmissão das deformações do aço para o material compósito do transdutor, uma vez que este fenómeno é regido pela distorção da cola provocada pelas forças de corte que se geram na interface.



Fig. 2.9 – Aplicação de pressão mecânica durante a colagem do transdutor.

Para assegurar uma adequada longevidade de qualquer sistema de monitorização, cuidados especiais têm que ser adoptados na instalação dos sensores, sobretudo se estes tiverem expostos a condições ambientais semelhantes àsquelas experimentadas pelos extensómetros aplicados na Ponte do Pinhão.

Após a aplicação do transdutor, um rectângulo de cortiça coberto por uma folha de polyester, é centrado com o extensómetro e colado à estrutura usando a mesma metodologia empregue na fixação dos sensores (Fig. 2.10).



Fig. 2.10 – Aplicação de pressão mecânica durante a colagem da protecção.

Posteriormente, a folha de polyester é impregnada com resina epóxida de protecção com a ajuda de uma trincha/pincel, colando simultaneamente as fibras à superfície metálica e selando de imediato a entrada de humidade para o extensómetro. Esta operação e o aspecto geral da protecção antes da pintura da superfície metálica podem ser observados na figura 2.11.

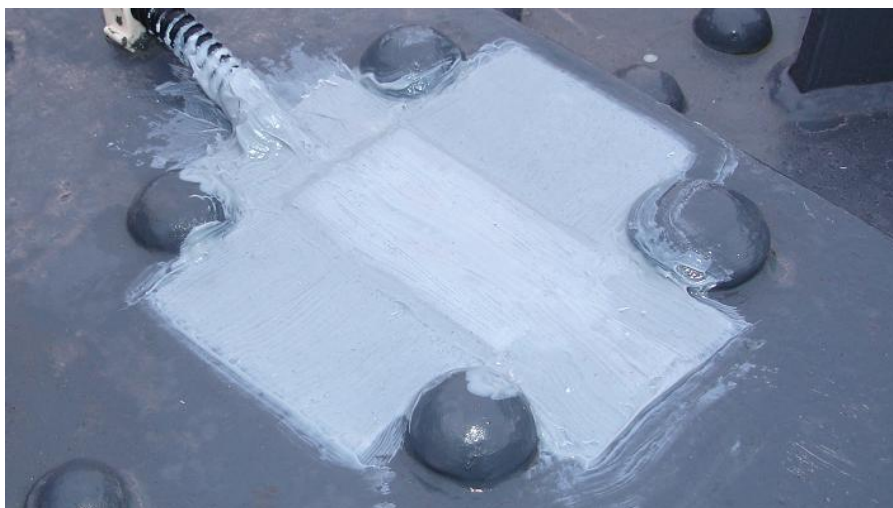


Fig. 2.11 - Aspecto geral da protecção antes da pintura da superfície metálica.

Finalmente, quando a resina se encontra completamente curada, toda a superfície é pintada com tinta epoxy empregue na pintura e protecção do aço. Este tipo de protecção, aplicada a extensómetros instalados na superfície metálica, proporciona protecção mecânica através da camada de cortiça, e em simultâneo evita a insolação directa da área envolvente ao sensor. A resina de protecção e a tinta

possibilitam a resistência contra um conjunto variado de factores ambientais, tais como a insolação, radiações ultra-violeta, água da chuva e humidade. Consequentemente, a durabilidade é assegurada e o nível de perturbação introduzido nas leituras é mínimo, uma vez que os materiais empregues possuem baixa rigidez quando comparada com a do aço. Por outro lado, o aspecto geral da instalação resultante é muito discreto (Fig. 2.12).



Fig. 2.12 - Aspecto final da aplicação de um transdutor.

2.4. MEDIÇÃO DE ROTAÇÃO

Os inclinómetros utilizados permitem medir inclinações, numa dada direcção (Fig. 2.13) ou nas duas direcções (Fig. 2.14), em relação a um plano horizontal, até $\pm 1^\circ$. Trata-se de um sensor potenciométrico que consiste essencialmente na medição do movimento imposto a um pêndulo, que se desloca num meio viscoso, com 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.



Fig. 2.13 – Inclínómetro uniaxial.



Fig. 2.14 – Inclínómetro biaxial.

2.5. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

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. Os sensores de temperatura utilizados foram detectores resistivos.

Um detector de temperatura resistivo (RTD — *resistance temperature detector*) é um sensor de temperatura baseado no princípio da variação da resistência do metal com a temperatura. O metal mais usado neste tipo de sensores é a platina, sendo por vezes designado por PRT (*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 às da platina, constituindo para certas gamas de medição uma solução economicamente mais atraente.

O elemento sensor 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 2.15 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.



Fig. 2.15 - Exemplo de um sensor de temperatura PT100.

O encapsulamento dos PT100 varia de acordo com as aplicações que se pretende fazer. A figura 2.16 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.



Fig. 2.16 - Encapsulamento do sensor de temperatura PT100.

3

MEDIÇÃO DE INFRAESCAVAÇÃO – SONAR

3.1. INTRODUÇÃO

A infraescavação resulta da acção erosiva da corrente da água, que escava o material do leito do rio para o depositar mais longe. Produz-se em todo o tipo de solo a velocidades diferentes. Nos solos granulares a infraescavação é rápida, enquanto que nos solos sedimentares o fenómeno de infraescavação é mais lento uma vez que se trata de um solo mais resistente, mas em ambos os solos a profundidade da infraescavação pode ser a mesma.

A infraescavação começa logo que o regime hidráulico do rio é modificado, podendo causar acidentes muito sérios (Fig. 3.1).



Fig. 3.1 – Tipo de acidente causado pela infraescavação.

Esse fenómeno pode-se produzir lentamente, dependendo da evolução natural do rio ou da actividade humana, exemplo de uma actividade humana, extracção de material do leito do rio para a sua futura utilização em obra. Neste último exemplo, a infraescavação pode ser compensada com vários materiais. Neste caso, pode existir mudança das características geotécnicas do solo devido à substituição de um material por outro.

Um exemplo bem conhecido de um acidente que pode ser atribuído à actividade humana, trata-se do acidente na ponte Entre-os-Rios (Fig. 3.2 e Fig. 3.3); O relatório pericial sobre as causas da queda da ponte de Entre-os-Rios solicitado pelo Tribunal de Castelo de Paiva indica que a extracção de areias foi a causa principal do acidente.

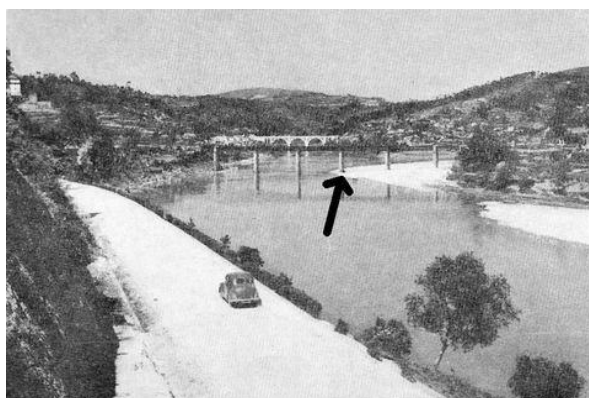


Fig. 3.2 – Ponte antes do acidente.



Fig. 3.3 – Ponte depois do acidente.

A infraescavação produz-se igualmente de modo local em redor das estacas de fundação, geralmente provocada pela própria perturbação induzida pelos elementos estruturais, e que pode levar ao potencial aparecimento de zonas de vazio de dimensões apreciáveis que podem pôr a descoberto as respectivas fundações e comprometer seriamente a segurança estrutural (Fig 3.4)

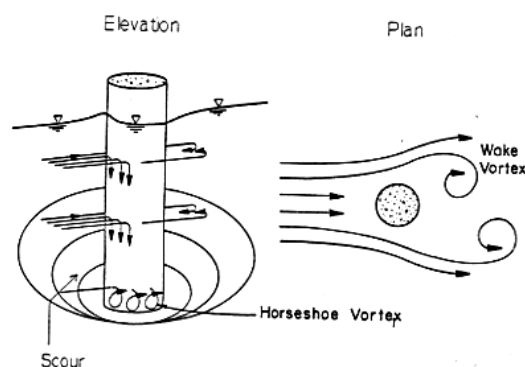


Fig. 3.4 – Princípio da criação de uma infraescavação localizada.

Nota-se que o fenómeno da infraescavação é a principal causa dos danos graves em pontes, apesar de ser pouco frequente. Para detecção da infraescavação as pontes são em geral inspeccionadas por mergulhadores, numa frequência que depende da velocidade prevista para a sua evolução, que varia em geral de 2 a 5 anos (Note Technique N°19-Detection des affouillements).

3.2. SISTEMA DE VIGILÂNCIA

O interesse de adoptar um sistema de vigilância contínua é obter informações que não podem ser obtidas através de inspecções de rotina, como por exemplo:

- Prever rapidamente os riscos dos danos causados por uma cheia.
- Prever a evolução da infraescavação, permitindo adoptar medidas de restauração a tempo, e evitando assim medidas de reparação que podem ser muito dispendiosas.
- Fornecer valores da evolução do fenómeno da infraescavação em tempo real que servem de dados para calibrar e/ou validar modelos de previsão da infraescavação.

3.2.1. SONDA

A sonda é o sistema manual mais antigo concebido para determinar a profundidade da água. Pode ser facilmente adoptada para assegurar um contínuo conhecimento da infraescavação. Para isso, a sonda deve ser instalada no interior de um tubo guia para assegurar que fique vertical e deve possuir uma base larga para não penetrar.

A sonda manual pode ser equipada dum contador automático junto com um sistema de aquisição dos dados permitindo um registo contínuo. Quando a altura da água é importante, este sistema não é adequado.

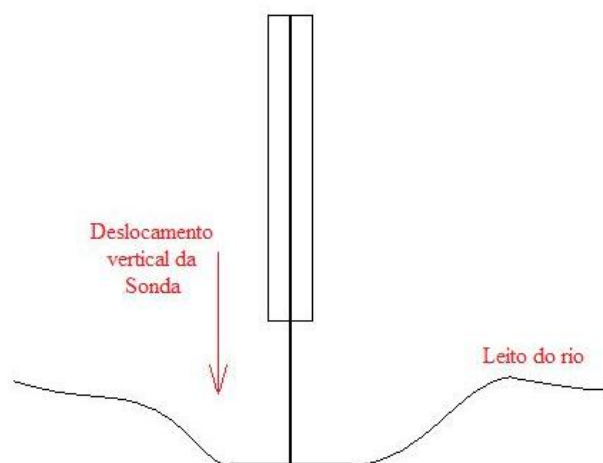


Fig. 3.5 – Princípio do sistema de sonda.

3.2.2. ANEL MAGNÉTICO DESLIZANTE

O sistema consiste num tubo em aço inoxidável e um anel magnético deslizante à volta deste mesmo tubo (Fig. 3.6). O anel está pousado no fundo e é livre de se deslocar ao longo do tubo. Uma série de “bobines” espaçadas de igual distância no interior do tubo, podem detectar o campo magnético do anel conforme esse anel desce ao longo do tubo. As bobines são geralmente espaçadas de 15cm. O sistema pode facilmente ser fixado a um pilar (Fig. 3.7), o equipamento de registo de dados pode ser instalado no tabuleiro (Hani Nassif, 2002).

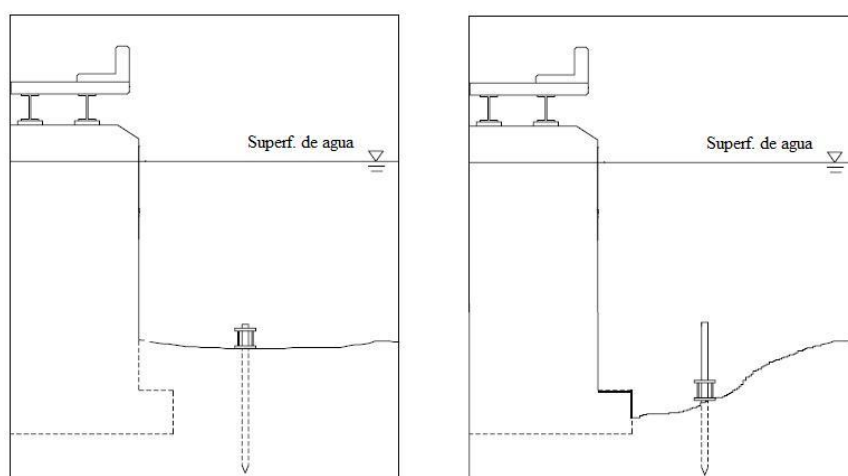


Fig. 3.6 – Princípio de funcionamento do sistema de anel magnético deslizante.

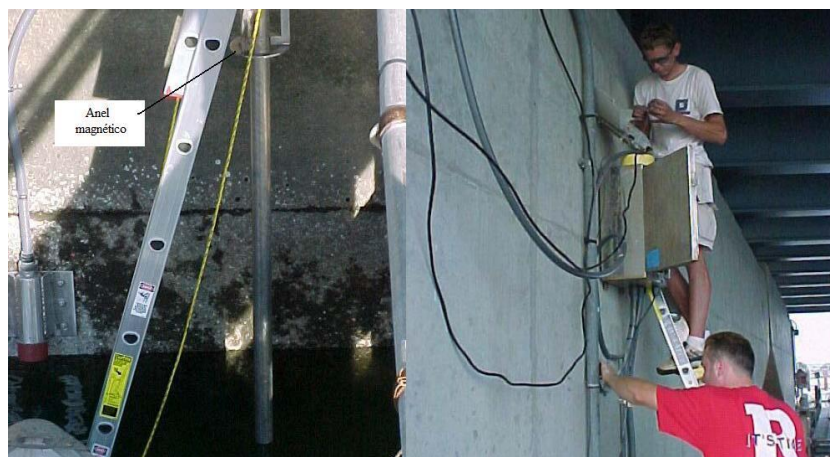


Fig. 3.7 – Exemplo de uma instalação de um anel magnético deslizante.

3.2.3. SONAR

O Sonar mede o tempo de trajeto de uma onda sonora que é reflectida no fundo do rio (Fig. 3.8). O sistema pode ser adaptado a partir de um Sonar de detecção de fundo marítimo (Fig. 3.9). O dispositivo pode ser ligado a um sistema de aquisição e de transmissão automática dos dados.

A existência dum escoamento demasiado turbulento e a presença de bolhas de ar ou de sedimentos em suspensão podem falsear as medidas. A possibilidade de fixação de algas ou de organismos sobre o receptor deve ser avaliado porque pode igualmente falsear as medições. Esse dispositivo necessita, em geral, de uma verificação regular do seu funcionamento. A vantagem deste sistema é ter um custo aceitável e a facilidade na sua montagem.

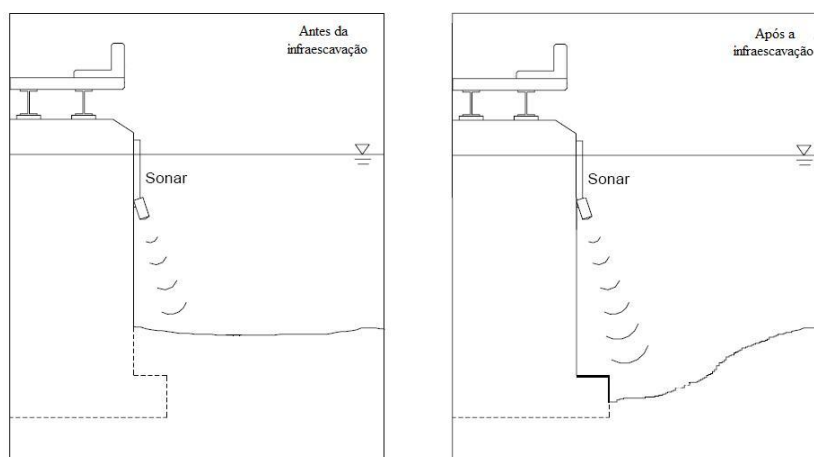


Fig. 3.8 – Princípio de funcionamento e um Sonar.



Fig. 3.9 – Sonar marítimo.

Posteriormente, será abordado com mais cuidado, a questão da utilização do Sonar, tais como os efeitos da temperatura, salinidade e turvação da água na sua funcionalidade (James D. Schall, 2004).

3.2.4. TRANSDUTOR DE DEFORMAÇÃO ENTERRADO

A técnica consiste em penetrar o solo com um varão flexível contendo um ou mais sensores de deformação axial (Fig. 3.10). Enquanto que o sensor estiver enterrado não se medem deformações. Logo que a infraescavação se dá, uma parte do transdutor fica fora do solo e inclina-se no sentido do escoamento do rio, criando uma deformação axial (devida à flexão da barra) que é medida por sua vez. Quanto mais a infraescavação evolui mais o transdutor fica fora do solo e a deformação medida será mais importante, indicando a evolução da infraescavação.

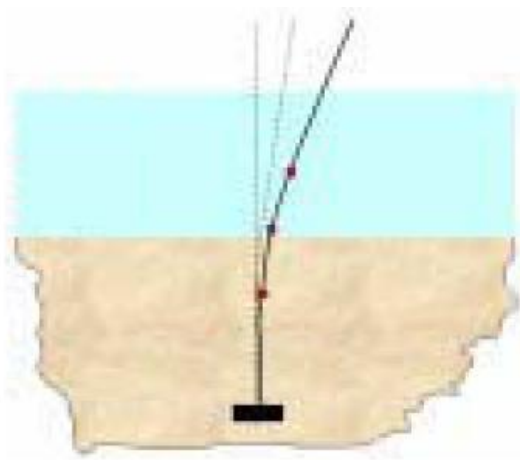


Fig. 3.10 – Princípio de funcionamento do sensor enterrado.

Vários pontos podem ser instrumentados, espaçados regularmente, sobre o varão flexível para “forçar” a sua deformação logo que esse mesmo varão é descoberto. O sensor deve estar envolvido por uma areia própria.

As duas principais técnicas de medir deformações axiais baseiam-se quer em extensometria eléctrica quer em sensores de Bragg em fibra óptica.

3.2.5. OUTROS DISPOSITIVOS

Existem outros dispositivos de vigilância da infraescavação, mas que não são muito utilizados ou até comercializados tais como, sensor de pressão total, sensor piezoelectrónico, interruptor de mercúrio, etc.

3.2.6. CONCLUSÃO

Existe uma grande variedade de sistemas para analisar o fenómeno de infraescavação. Muitos estão em estado de desenvolvimento, outros ainda teóricos e outros com fiabilidade reduzida.

Os únicos dispositivos que apresentam uma certa fiabilidade são a sonda, o anel magnético deslizante e o Sonar. A tabela seguinte recapitula as principais características dos sistemas.

	Sonda	Anel magnético deslizante	Sonar
Instalação	Fácil	Fácil	Fácil
Manutenção	Pouca	Pouca	Verificação regular, e limpeza dos elementos sensíveis do sensor
Reposicionamento	Pode ser difícil	Pode ser difícil	Fácil
Profundidade de água	Limitada	Indiferente	>2m até 100m
Efeitos devido a sedimentos, bolhas de ar	Pouco sensível	Pouco sensível	Sensível
Medir o enchimento da infraescavação	Impossível	Impossível	Possível

Um sistema de vigilância adaptado para todo o tipo de situações não existe propriamente, dependendo do tipo de informação pretendida. Se o interesse for somente na “escavação” provocada pela infraescavação, o sistema mais adequado será o do anel magnético deslizante uma vez que existe mais experiência com este sistema. Em contra partida se o interesse é acompanhar a evolução da infraescavação, escavação e enchimento, o sistema mais adequado será sem dúvida o Sonar.

3.3. SONAR

Um dos principais objectivos deste trabalho, como já referido, consiste no estudo da sensibilidade e estabilidade da utilização do Sonar, para tal estudo preparou-se vários ensaios em laboratório e em campo, que serão posteriormente descritos.

O Sonar utilizado foi o modelo Benthos PSA-916 Sonar Altimeter (Fig. 3.11), que se caracteriza por medir o tempo de trajecto de uma onda sonora que é reflectida no fundo e transmitida pela água, como já descrito anteriormente no processo de medição com Sonar.



Fig. 3.11 – Benthos PSA-916 Sonar Altimeter.

Resume-se, seguidamente, as principais especificações técnicas fornecidas pelo fabricante do sensor utilizado:

Especificações técnicas

Frequência de transmissão:	200 kHz
	Internal key: 5 Hz
Frequência de leitura:	External key: definida pelo utilizador
Ângulo de incidência:	14° cónicos
Profundidade máxima de serviço:	6000 metros
Intervalo de leitura:	1.0 a 100 metros
Saída analógica:	0 a 5 VDC
Saída digital:	RS-232: baud rate 9600, 4800, 2400

	ou 1200 (seleccionável)
Resolução:	RS-232: 1 cm Analógica: 2,5cm
Alimentação:	6 a 24 VDC
Corrente:	50 mA @ 15 VDC 100 mA @ 6 VDC
Dimensões:	57,2 (Ø) x 238,3 (L) mm
Peso:	No ar: 635 g Na água: 363 g

Para a utilização do Sonar quer em laboratório quer no campo necessitou-se também de um equipamento de aquisição de sinal eléctrico, chamado Datalogger DataTaker DT515 (Fig. 3.12)



Fig. 3.12 – Datalogger DataTaker.

O Datalogger DataTaker foi utilizado para converter o sinal adquirido pelo Sonar durante as leituras em sinal analógico.

3.4. ENSAIOS REALIZADOS

3.4.1. INTRODUÇÃO

Foi realizado um conjunto de ensaios em laboratório, para sobretudo averiguar a sensibilidade do equipamento e a sua estabilidade ao longo do tempo e face a diferentes condições de propagações das ondas sonoras.

Uma vez que o Sonar é utilizado em diferentes obras, em que as condições do meio nas quais o Sonar é submerso variam de localização para localização (tal como a salinidade), como também depende da época do ano (a temperatura).

A velocidade de propagação de uma onda sonora num meio qualquer depende das características desse mesmo meio. No nosso caso trata-se de um meio líquido, por isso efectuaram-se vários testes relacionados com a alteração das propriedades no líquido, melhor dizendo da água.

Os ensaios dividiram-se em duas partes, uma das partes foi realizada em laboratório e outra em ambiente fluvial. Os ensaios em laboratório consistiram em alterar as propriedades da água na qual se encontrava submerso o Sonar, tais como: variar a temperatura da água; a percentagem de salinidade na água e por fim variar turvação da água. O ensaio em campo consistiu em efectuar várias leituras num meio fluvial, para nos aproximarmos da realidade.

3.4.2. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

3.4.2.1. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA

Um dos objectivos no estudo em laboratório do Sonar foi o de quantificar a influência da temperatura nas leituras do Sonar. O Sonar é utilizado em muitas obras e em qualquer altura do ano, assim sendo, a temperatura da água na qual é submerso nunca é constante, existindo uma necessidade de verificar se tal variação da temperatura da água interfere nas leituras do Sonar.

Uma onda sonora depende do meio no qual se vai propagar, isto é, um meio gasoso, líquido ou sólido. Neste caso, falar-se-á no meio líquido uma vez que o Sonar só pode ser utilizado em meios líquidos.

A velocidade de propagação de uma onda no meio líquido depende das propriedades desse líquido, tais como, viscosidade, salinidade, temperatura, pressão, etc.

Como se constata no gráfico seguinte, a temperatura influencia a velocidade de propagação de uma onda sonora em água (Jean Jacques, Anne, Erwan; 2006).

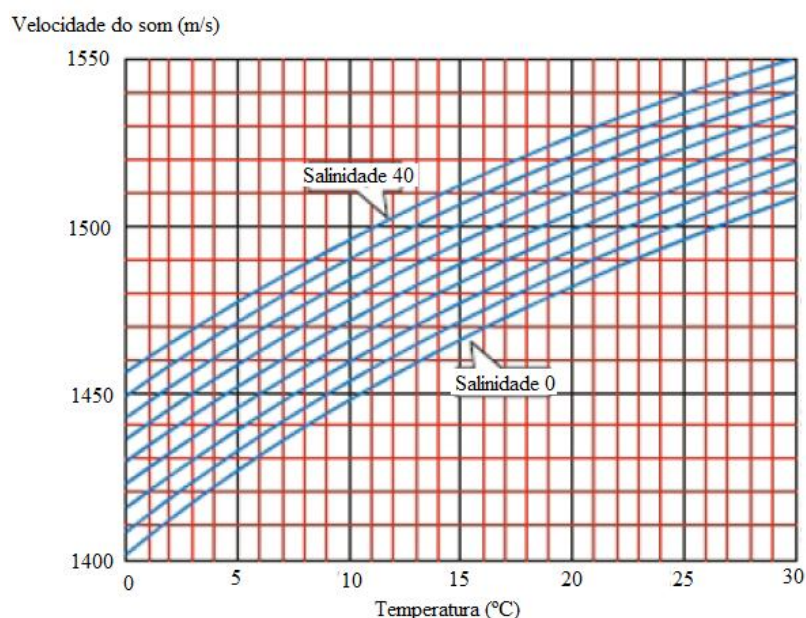


Fig. 3.13 - Velocidade do som em função da temperatura e da salinidade.

A fórmula que traduz esse mesmo gráfico é a seguinte:

$$V = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z$$

T – Temperatura a qual se encontra o líquido (°C)

S – Salinidade (‰)

z – Profundidade (m)

Teoricamente a temperatura influencia a velocidade de propagação, existe um aumento de 3,66 m/s na velocidade para cada aumento unitário de grau de temperatura. À priori, parece desprezável o efeito da temperatura, mas como se poderá verificar os efeitos de temperatura tem uma influência considerável nas leituras. Para ver a sua importância, transcreve-se dois exemplos práticos.

1º Exemplo:

Um Sonar instalado a uma distância do fundo de 1,5m, o tempo de trajecto da onda sonora desde do instante que é emitida até ao instante que é lida pelo próprio Sonar para diferentes temperaturas é dado por:

$$V_{0^{\circ}\text{C}} = 1400 \text{ m/s (Fig. 3.13)}$$

$$V_{0^{\circ}\text{C}} = \frac{m}{t} \Leftrightarrow 1400 = \frac{1,50}{t_{0^{\circ}\text{C}}} \Leftrightarrow t_{0^{\circ}\text{C}} = 0,0021429 \text{ s}$$

$$V_{30^{\circ}\text{C}} = 1510 \text{ m/s (Fig. 3.13)}$$

$$V_{30^{\circ}\text{C}} = \frac{m}{t} \Leftrightarrow 1510 = \frac{1,50}{t_{30^{\circ}\text{C}}} \Leftrightarrow t_{30^{\circ}\text{C}} = 0,0019868 \text{ s}$$

Os tempos de percurso são diferentes, a primeira vista parece desprezável uma vez que só varia de 0,000156s. O Sonar está preparado para converter esse tempo em distância, tendo o tempo e velocidade obtém-se a distância. O problema surge na questão da velocidade. O Sonar tem para a velocidade uma constante de 1490m/s já definida a partida, na realidade a velocidade não é 1490m/s mas varia consoante a temperatura da água.

Ou seja, o tempo de propagação da onda sonora será dependente da velocidade de propagação, que por sua vez é dependente da temperatura do meio líquido. Logo a distância medida pelo Sonar a 1,50m para as respectivas temperaturas de 0°C e 30°C, partindo do princípio que tem como constante para a velocidade de 1490 m/s, será:

$$m_{0^{\circ}\text{C}} = V \times t \Leftrightarrow 1490 \times 0,002143 = 1,60 \text{ m}$$

$$m_{30^{\circ}\text{C}} = V \times t \Leftrightarrow 1490 \times 0,0019868 = 1,480\text{m}$$

Como podemos observar existe um erro de 12cm entre leituras, repetindo agora esse mesmo raciocínio para outro exemplo.

2º exemplo

Um Sonar instalado a uma distancia do fundo de 90,0m, o tempo de trajecto da onda sonora desde do instante que é emitida até ao instante que é lida pelo próprio Sonar para diferentes temperaturas é dado por:

$$V_{0^{\circ}\text{C}} = 1400\text{m/s (Fig. 3.13)}$$

$$V_{0^{\circ}\text{C}} = \frac{m}{t} \Leftrightarrow 1400 = \frac{90}{t_{0^{\circ}\text{C}}} \Leftrightarrow t_{0^{\circ}\text{C}} = 0,1285714\text{s}$$

$$V_{30^{\circ}\text{C}} = 1510\text{m/s (Fig. 3.13)}$$

$$V_{30^{\circ}\text{C}} = \frac{m}{t} \Leftrightarrow 1510 = \frac{90,0}{t_{30^{\circ}\text{C}}} \Leftrightarrow t_{30^{\circ}\text{C}} = 0,1192053\text{s}$$

Existe uma diferença de 0,0093661s, a distância medida pelo Sonar a 90,0m para as respectivas temperaturas de 0°C e 30°C, partindo do princípio que tem como constante para a velocidade de 1490 m/s será:

$$m_{0^{\circ}\text{C}} = V \times t \Leftrightarrow 1490 \times 0,1285714 = 95,79\text{m}$$

$$m_{30^{\circ}\text{C}} = V \times t \Leftrightarrow 1490 \times 0,1192053 = 88,81\text{m}$$

Existe um erro de 6,98m para um aumento de 30°C, podendo-se concluir que teoricamente existira sempre um erro de 7,9% para um aumento de 30°C da temperatura do líquido, e quanto mais fundo for o leito do rio, maior será a diferença entre a medida real e a medida dada pelo Sonar.

Existe assim uma necessidade de provar em laboratório se realmente a temperatura interfere de forma tão significativa como indicam as leituras nas medições do Sonar.

Em laboratório para avaliar a interferência da temperatura na leitura do Sonar foram utilizados os seguintes materiais: um tubo de acrílico de 150mm de diâmetro externo, 144mm de diâmetro interno e de 3,60m de comprimento, uma resistência, um sensor de temperatura e o próprio Sonar.

O procedimento do ensaio foi o a seguir indicado. Encheu-se o tubo de água à temperatura de 6°C, esse mesmo tubo foi colocado num recipiente cheio de água e dotado de uma resistência eléctrica; podemos dizer que foi feito uma espécie de banho-maria (Fig. 3.14). A água do recipiente foi aquecida pela resistência que por sua vez aquecia a água do tubo de acrílico. Colocou-se no tubo o Sonar e um sensor de temperatura; o sensor de temperatura encontrava-se ao nível do Sonar (Fig 3.15).

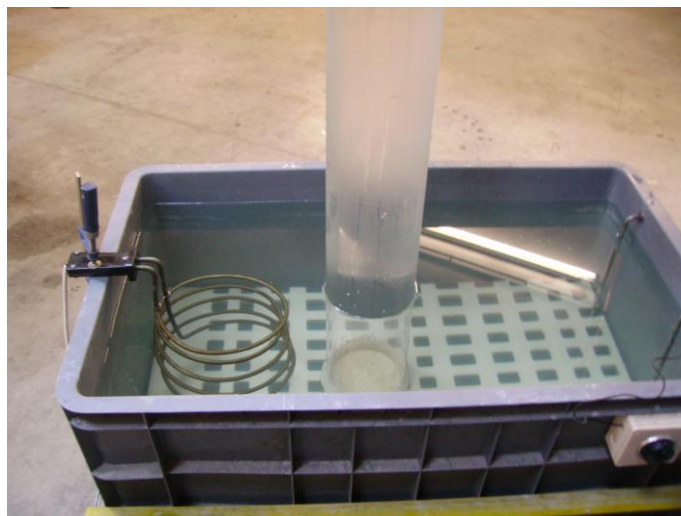


Fig. 3.14 – Metodologia para aquecer a água (banho-maria).



Fig. 3.15 – Visualização geral do ensaio.

O objectivo neste ensaio, já referido inicialmente, foi avaliar o efeito da temperatura na leitura do Sonar. Para isso teve-se de variar ao máximo a temperatura, já que quanto maior o intervalo de variação de temperatura, maior o número de leituras e maior confiança se pode ter no ensaio. Conseguiu-se variar a temperatura de 6,2°C até aos 31°C. Passando agora aos resultados obtidos para a colocação do Sonar a altura de 2,04m, obtém-se o seguinte gráfico.

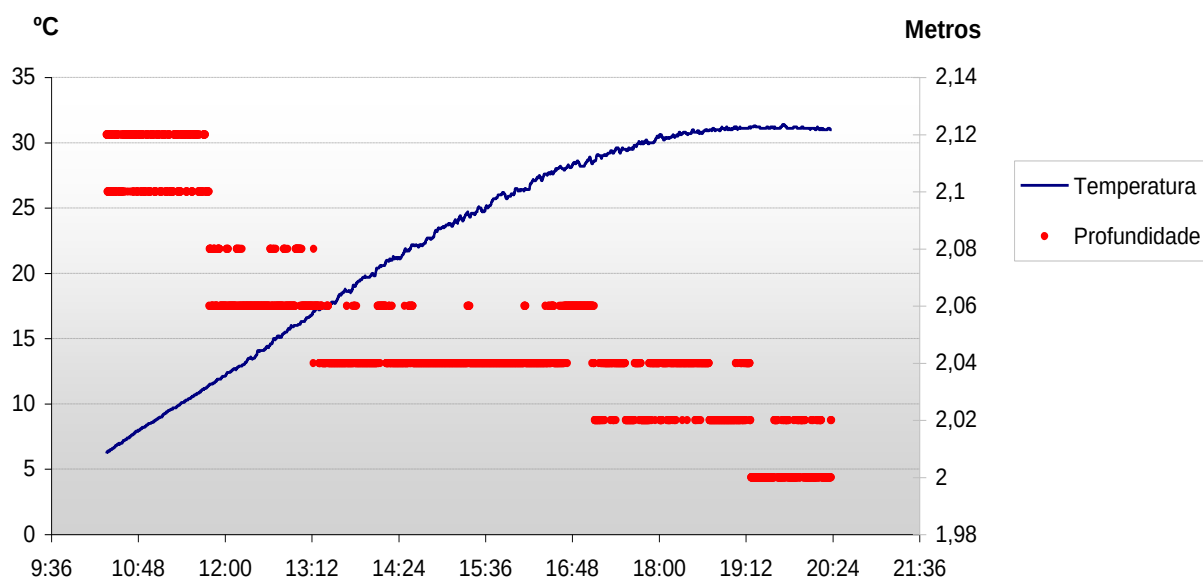


Fig 3.16 – Evolução da temperatura e da profundidade medida ao longo do tempo.

Observando o gráfico anterior, e sabendo que o Sonar se encontrava a uma altura do fundo de 2,04m, conclui-se que o Sonar não está preparado para efectuar a leitura para diferentes temperaturas, mas sim somente para uma temperatura compreendida entre os 15 a 25°C.

Passando agora a uma comparação entre diferentes resultados, resultados esses: teóricos, práticos e reais. Os resultados teóricos consistem nos resultados aos quais deveríamos chegar na leitura do Sonar, uma vez que o Sonar tem como velocidade uma constante de 1490 m/s; os resultados práticos consistem nos obtidos em laboratório e por fim os resultados reais consistem na altura realmente a qual se encontrava o Sonar, ou seja, a altura de 2,04 m.

Resultados teóricos

Para determinar os resultados teóricos, foi utilizado a fórmula apresentada anteriormente, que define a velocidade de propagação de uma onda sonora num meio líquido em função da temperatura, salinidade e profundidade. Foram desprezados os efeitos devido à profundidade, pelo facto de serem pouco relevantes. Foi utilizado, como constante de velocidade do Sonar, 1490m/s, logo os resultados teóricos aos quais deveríamos chegar na leitura do Sonar são os seguintes:

$$V' \times t = m'$$

V' – Velocidade de leitura do Sonar 1490 m/s,

t – tempo real desde a fonte até ao ponto de reflexão (s),

m' – profundidade dada pelo Sonar (m)

$$t = \frac{m}{V}$$

m – Profundidade real (m)

t – Tempo real desde a fonte até ao ponto de reflexão (s),

V – Velocidade real da propagação do som no meio líquido (m/s)

$$V = 1444,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z$$

T – Temperatura a qual se encontra o líquido (°C)

S – Salinidade (‰)

z – Profundidade (m)

Logo a profundidade teórica dada pelo Sonar é igual a:

$$m' = V \times \frac{m}{V} = 1490 \times \frac{m}{1444,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z}$$

Uma vez que é desprezada a parcela devida à profundidade e que se trata de água doce, em que a salinidade é igual a zero, chega-se a uma expressão mais simplificada:

$$m' = 1490 \times \frac{m}{1444,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T) \times 35}$$

Passando agora a representação gráfica dos resultados teóricos do Sonar:

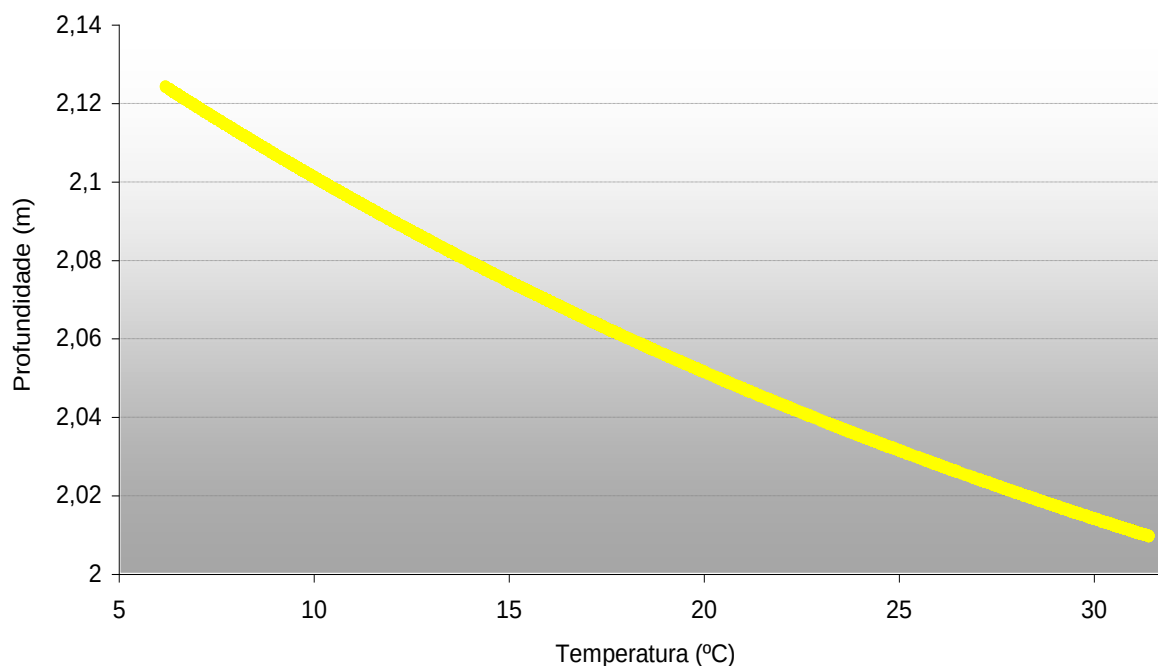


Fig. 3.17 – Resultados teóricos do Sonar.

Resultados práticos

Os resultados práticos consistem nos obtidos em laboratório no ensaio anteriormente descrito, passando a representação desses valores num gráfico profundidade/temperatura.

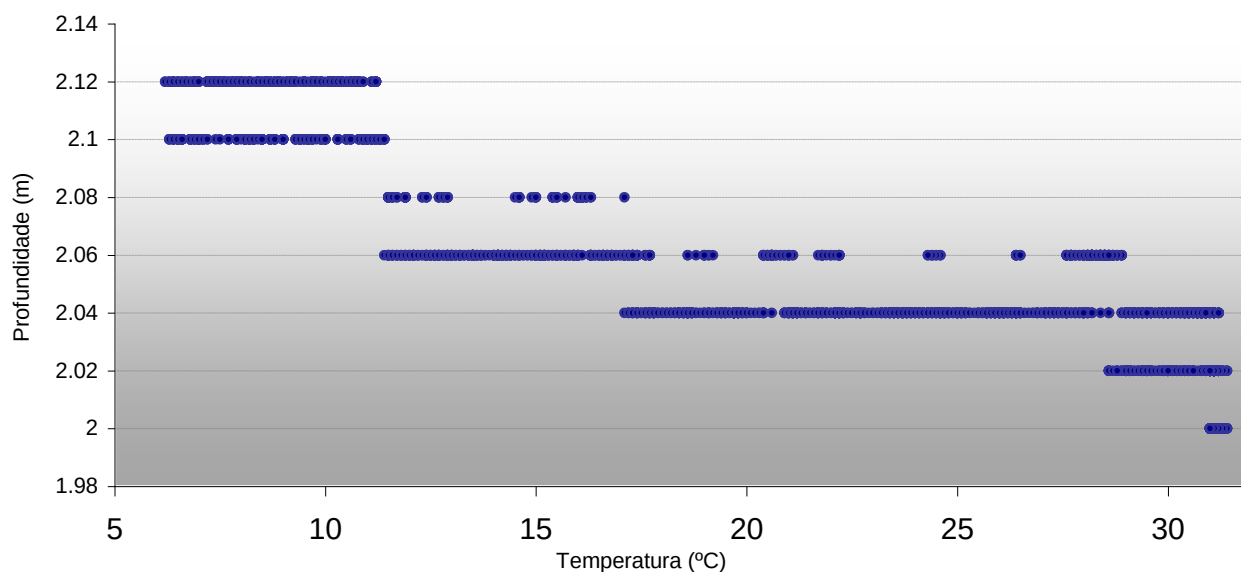


Fig. 3.18 – Resultados práticos do Sonar.

Resultados reais.

Os resultados reais consistem na altura realmente a qual foi colocado o Sonar. Neste presente ensaio foi colocado a uma profundidade de 2,04m, passando a representação gráfica dos resultados reais num gráfico profundidade/temperatura:

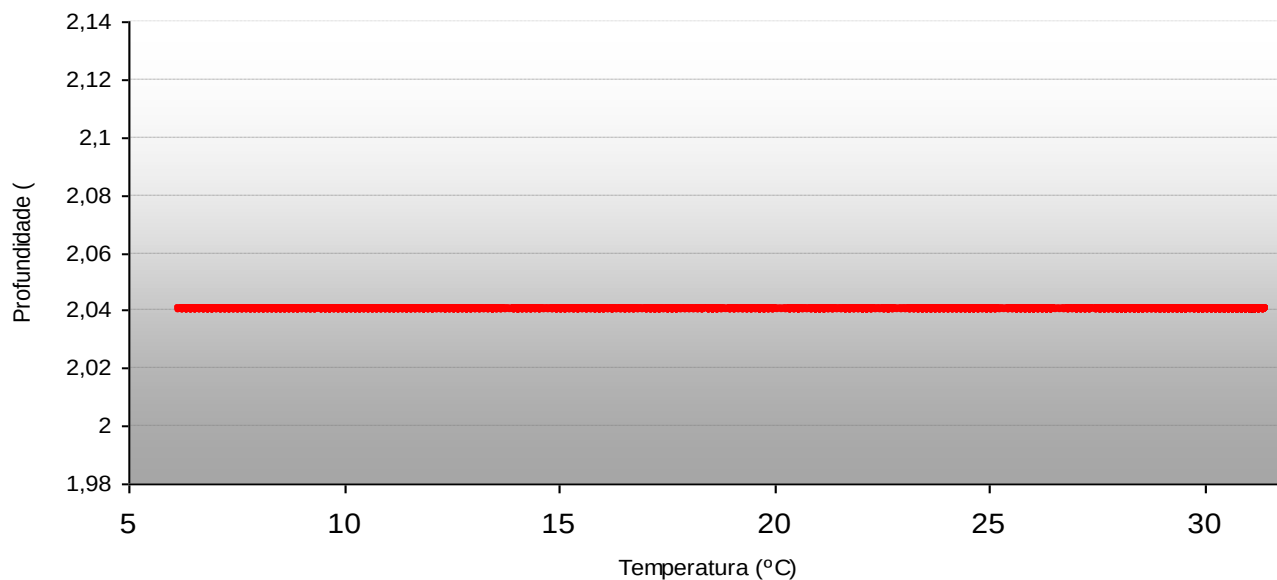


Fig. 3.19– Resultados reais.

Comparando os três tipos de resultados num mesmo gráfico, chegamos ao seguinte gráfico:

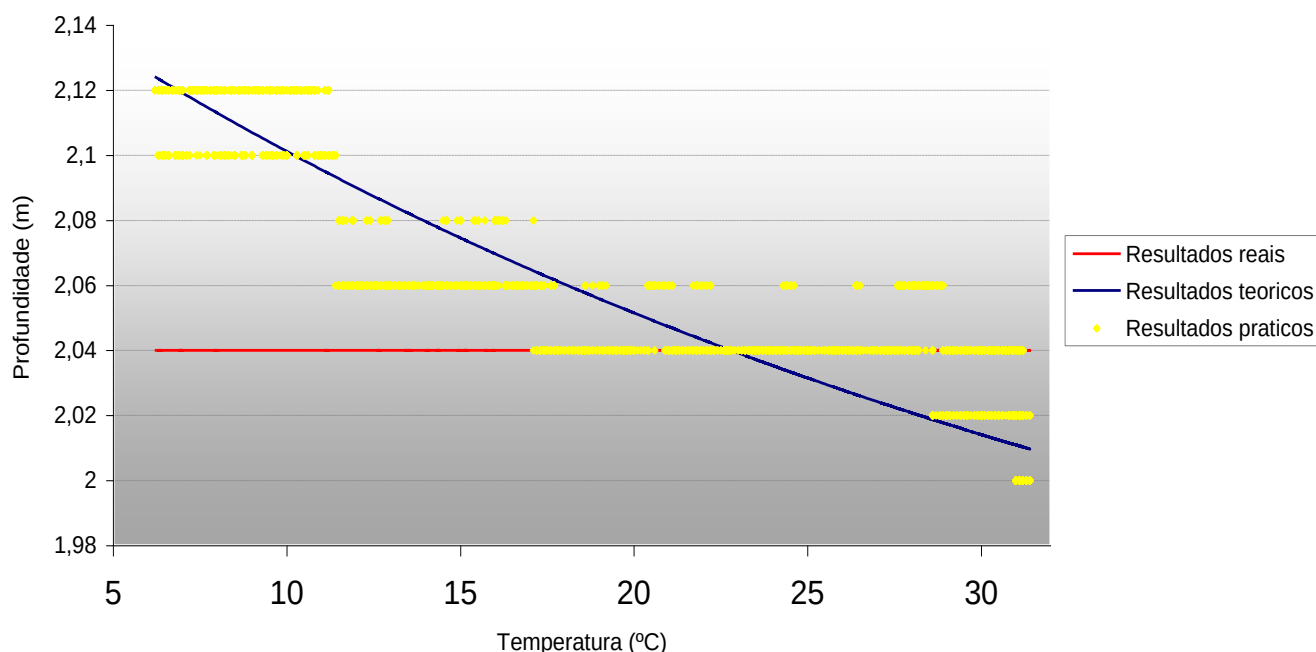


Fig. 3.20– Comparação dos resultados.

Conclui-se então que os resultados teóricos se aproximam bastante dos resultados obtidos em laboratório (resultados práticos). Era possível ter resultados práticos da medição mais próximos da curva teórica se fosse feita uma leitura com mais casas decimais. Também se pode concluir que o Sonar está preparado para ser utilizado a uma temperatura compreendida entre os 15°C e 25°C uma vez que temos uma margem de erro de 2cm. A priori, o intervalo de variação de temperatura no ensaio pode ser considerado um pouco limitado, mas na realidade o Sonar dificilmente será utilizado em temperaturas fora desse intervalo. Resumindo, a temperatura tem a sua interferência nas leituras do Sonar, sem dúvida nenhuma, mas nada de muito significativo para a sua utilização em obra uma vez que as águas dos rios e mares encontram-se a uma temperatura para a qual o Sonar esta preparado com margem ligeiras de erro.

3.4.2.2. VARIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE SALINIDADE DA ÁGUA

Anteriormente foi referido que a salinidade interferia na velocidade de propagação de uma onda sonora num meio líquido, houve assim mais uma vez, interesse em provar em laboratório se realmente tal acontecia. Numa primeira parte, falar-se-á na importância da salinidade na leitura do Sonar, numa segunda parte no ensaio elaborado em laboratório, numa terceira parte comparar-se-ão vários resultados, resultados esses, teóricos, práticos e reais.

Começando pela importância da salinidade na leitura do Sonar, como se consta do gráfico seguinte, e já referido anteriormente, a velocidade de propagação de uma onda sonora depende da salinidade da água (Jean Jacques, Anne, Erwan; 2006).

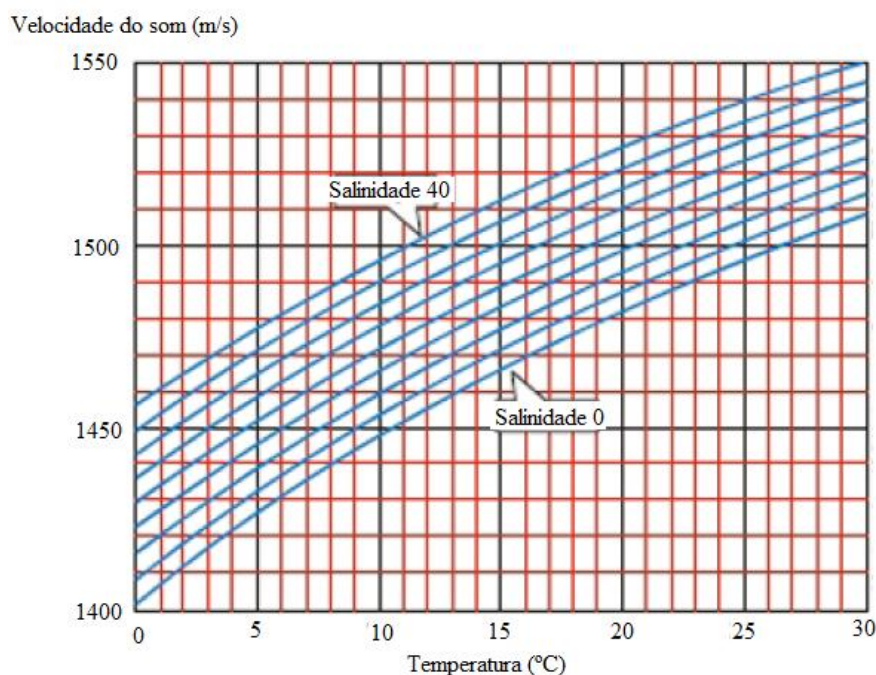


Fig. 3.21 - Velocidade do som em função da temperatura e da salinidade.

A fórmula que traduz esse mesmo gráfico, já anteriormente apresentado tem o seguinte aspecto:

$$V = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z$$

T – Temperatura a qual se encontra o líquido (°C)

S – Salinidade (‰)

z – Profundidade (m)

A salinidade vem expressa em ‰ interpreta-se essa unidade em gramas por quilogramas de água; por exemplo um caso em que exista 20 ‰ de salinidade, tem-se 20 gramas (gr) de cloreto de sódio por quilograma (kg) de água, ou seja, 20 gramas de cloreto de sódio por litro.

Como se pode ler no gráfico, para uma temperatura constante, e somente se variar a salinidade, tem-se um aumento de velocidade em média de 1,19m/s por cada unidade em ‰ de salinidade. É de salientar que esse aumento de velocidade é linear com o aumento de salinidade, mas esse mesmo aumento de velocidade não é igual para todas as temperaturas nas quais se encontra a água. Por exemplo, para uma temperatura de 0°C existe um aumento da velocidade de 1,34m/s por cada aumento de 1‰ de salinidade, mas já para uma temperatura de 30°C tem-se um aumento da velocidade de 1,04m/s por cada aumento de 1‰ de salinidade.

Mais uma vez parecem desprezáveis, como anteriormente nos parecia, os efeitos da temperatura no Sonar; com dois exemplos simples e práticos ver-se-á que não podem ser desprezado os efeitos da salinidade.

Exemplo 1

O Sonar instalado a uma distancia do fundo de 2,00m na qual o água se encontra a temperatura de 23°C, e fazendo variar a salinidade de 0‰ para 40‰, o tempo de trajecto da onda sonora desde do instante que é emitida até ao instante que é lida pelo próprio Sonar para diferentes níveis de salinidade é dado por:

$$V_{0‰} = 1490m / s \text{ (Fig. 3.21)}$$

$$V_{0‰} = \frac{m}{t_{0‰}} \Leftrightarrow 1490 = \frac{2,0}{t_{0‰}} \Leftrightarrow t_{0‰} = 0,0026846s$$

$$V_{40‰} = 1535m / s \text{ (Fig. 3.21)}$$

$$V_{40‰} = \frac{m}{t} \Leftrightarrow 1535 = \frac{2,0}{t_{40‰}} \Leftrightarrow t_{40‰} = 0,0026059s$$

Existe uma diferença de 0,0007870s, a distância medida pelo Sonar a 2,0m, para as respectivas salinidades de 0‰ e 40‰, partindo do princípio que tem como constante para a velocidade de 1490 m/s será:

$$m_{0‰} = V \times t \Leftrightarrow 1490 \times 0,00268456 = 2,00m$$

$$m_{40‰} = V \times t \Leftrightarrow 1490 \times 0,0026059 = 1,94m$$

Observe-se a existência de um erro de 6,0cm entre leituras para uma variação de 40‰ de salinidade, repetindo agora esse mesmo raciocínio para outro exemplo.

Exemplo 2

O Sonar instalado a uma distância do fundo de 90,00m na qual água se encontra à temperatura de 23°C, e fazendo variar a salinidade de 0‰ para 40‰, o tempo de trajecto da onda sonora desde do instante que é emitida até ao instante que é lida pelo próprio Sonar para diferentes níveis de salinidade é dado por

$$V_{0‰} = 1490m / s \text{ (Fig. 3.21)}$$

$$V_{0‰} = \frac{m}{t_{0‰}} \Leftrightarrow 1490 = \frac{90,0}{t_{0‰}} \Leftrightarrow t_{0‰} = 0,1285714s$$

$$V_{40‰} = 1535m / s \text{ (Fig. 3.21)}$$

$$V_{40‰} = \frac{m}{t} \Leftrightarrow 1535 = \frac{90,0}{t_{40‰}} \Leftrightarrow t_{40‰} = 0,1172638s$$

Existe uma diferença de 0,0113076s, a distância medida pelo Sonar a 90,0m, para as respectivas salinidades de 0‰ e 40‰, partindo do princípio que tem como constante para a velocidade de 1490 m/s será:

$$m_{0\%} = V \times t \Leftrightarrow 1490 \times 0,120805 = 90,00m$$

$$m_{40\%} = V \times t \Leftrightarrow 1490 \times 0,117264 = 87,65m$$

Pode-se observar a existência de um erro de 2,35m, por isso, conclui-se que teoricamente existe sempre um erro de leitura e quanto mais profundo será o leito do rio maior será o erro de leitura.

Existiu interesse de provar em laboratório se realmente a salinidade interfere com essa importância nas medições do Sonar existente no LABEST, para isso foi elaborado um ensaio.

Para preparar esse ensaio em laboratório foram utilizados os seguintes materiais: um tubo de acrílico de 150mm de diâmetro externo, 144mm de diâmetro interno e de 3,60m de comprimento, cloreto de sódio, um sensor de temperatura e o próprio Sonar (Fig. 3.22).



Fig. 3.22 – Representação do ensaio para medir o efeito da salinidade da água.

Falando agora do procedimento do ensaio, inicialmente encheu-se o tubo de água a 0‰ de salinidade, sendo feitas várias leituras a várias profundidades: de seguida foi acrescentado cloreto de sódio até atingir os 10 ‰ de salinidade e novamente se efectuaram várias leituras em vários pontos, pontos estes que se encontravam a cota já predefinida inicialmente; repetiu-se esse procedimento para os 20‰, 30‰ e 40‰ de salinidade.

Teve-se o cuidado de registar sempre a temperatura do líquido, porque eram já conhecidos os efeitos da temperatura na leitura do Sonar. Durante o ensaio a temperatura manteve-se sensivelmente constante, o que foi positivo, para a apresentação dos resultados.

Na figura seguinte ilustra-se as fases da evolução do ensaio, desde dos 0‰ salinidade até aos 40‰ de salinidade.



Fig. 3.23 – Evolução da salinidade durante o ensaio.

Chegou-se aos resultados indicados no gráfico da figura 3.24 no ensaio da salinidade anteriormente descrito, a temperatura da água na qual estava submerso o Sonar ao longo do ensaio era de 22°C:

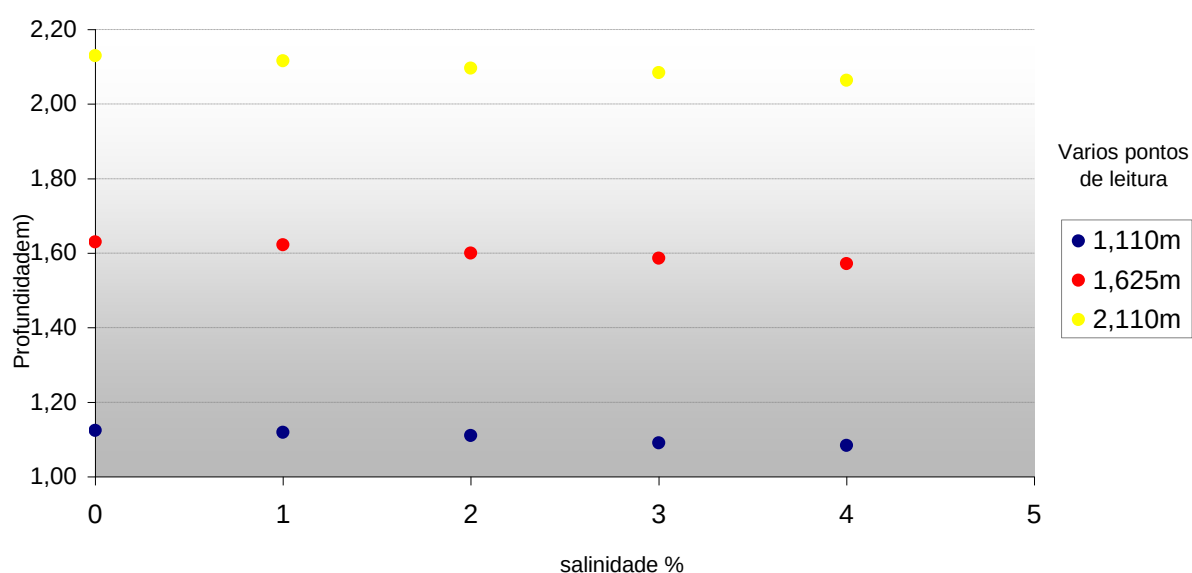


Fig. 3.24 – Resultados do ensaio da variação da salinidade.

Observando o gráfico anterior, conclui-se que o Sonar não está preparado para efectuar a leitura para diferentes graus de salinidade, a não ser que seja introduzida a correcção devida a este efeito.

Passando agora a uma comparação entre diferentes resultados, resultados esses: teóricos, práticos e reais. Os resultados teóricos baseiam-se na expressão analítica e correspondem aos que se deviam obter pela leitura do Sonar, tendo como constante de 1490 m/s de velocidade e uma temperatura de 22°C; os resultados práticos, consistem nos obtidos em laboratório e por fim os resultados reais consistem na altura a que realmente se encontrava o Sonar.

Resultados teóricos

Para determinar os resultados teóricos utilizou-se a fórmula apresentada anteriormente, que define a velocidade de propagação de uma onda sonora num meio líquido, em função da temperatura, salinidade e profundidade. Neste caso, desprezaram-se os efeitos devido à profundidade, pelo facto de serem poucos relevantes. A temperatura da água na qual se encontrava o Sonar era de 22°C e tem-se como constante de velocidade do Sonar 1490m/s, logo os seguintes resultados teóricos aos quais se deveria chegar com a utilização do Sonar são os seguintes:

$$V' \times t = m'$$

V' – Velocidade de leitura do Sonar 1490 m/s,

t – tempo real desde da fonte até ao ponto de reflexão (s),

m' – profundidade dada pelo Sonar (m)

$$t = \frac{m}{V}$$

m – Profundidade real (m)

t – Tempo real desde da fonte até ao ponto de reflexão (s),

V – Velocidade real da propagação do som no meio líquido (m/s)

$$V = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z$$

T – Temperatura a qual se encontra o líquido (°C)

S – Salinidade (‰)

z – Profundidade (m)

Logo a profundidade dada pelo Sonar é igual a:

$$m' = V' \times \frac{m}{V} = 1490 \times \frac{m}{1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z}$$

Uma vez que desprezou-se a parcela devida à profundidade e que a água se encontrava à temperatura de 22°C, chegou-se a uma expressão mais simplificada:

$$m' = 1480 \times \frac{m}{1,12 \times S + 1487,69}$$

Passando agora à representação gráfica dos resultados teóricos do Sonar, obtém-se:

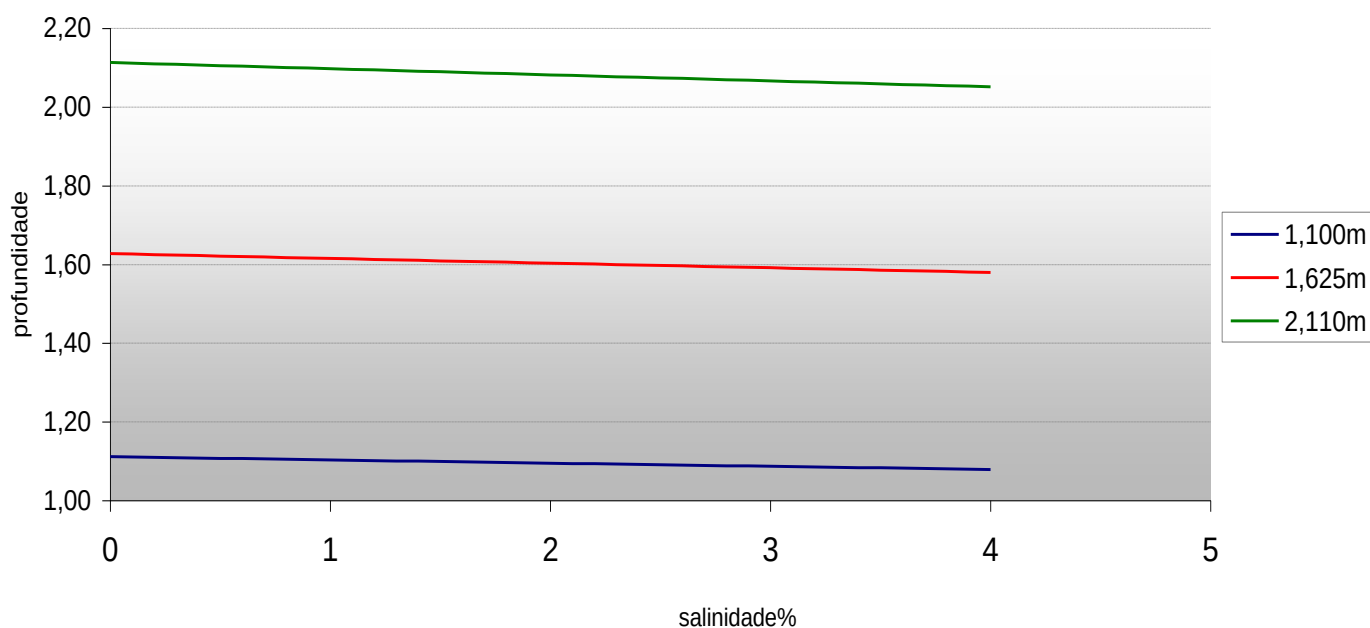


Fig 3.25 – Resultados teóricos do Sonar.

Resultados práticos

Os resultados práticos consistem nos obtidos em laboratório no ensaio anteriormente descrito, passando a representação desses valores num gráfico profundidade/salinidade.

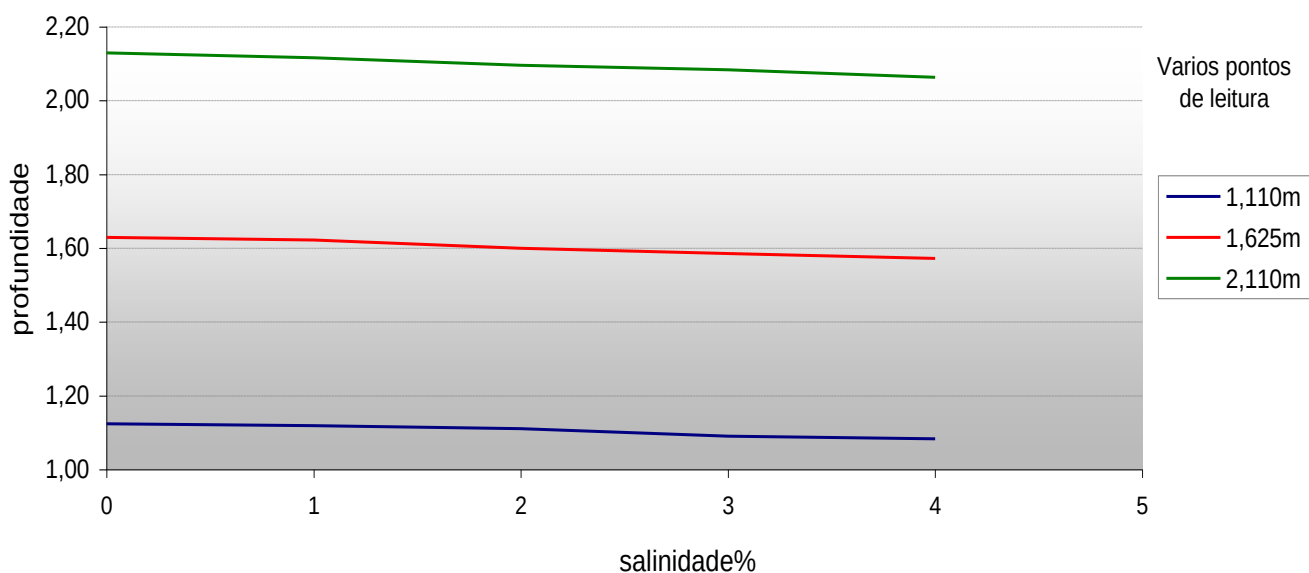


Fig. 3.26 – Resultados práticos do Sonar.

Resultados reais.

Os resultados reais consistem na altura real a que foi colocado o Sonar. No ensaio o Sonar foi colocado a três cotas diferentes, cotas essas de 1,110m, 1,625m e 2,110m, passando a representação gráfica dos resultados reais:

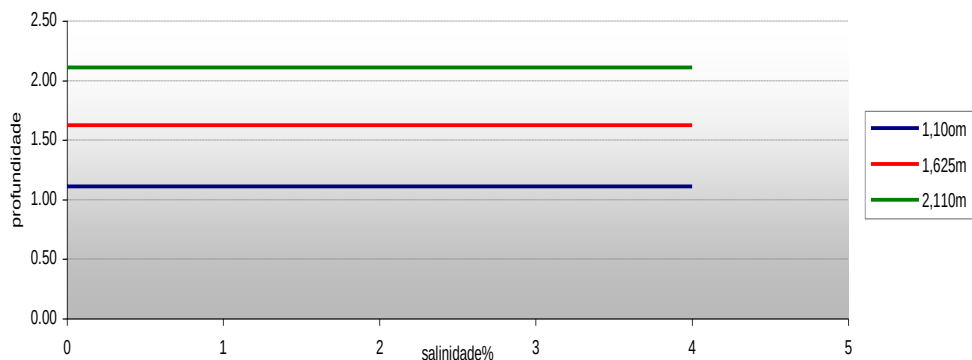


Fig. 3.27 – Resultados reais.

Comparando para cada ponto a cota diferente os três tipos de resultados num mesmo gráfico, obtiveram-se os gráficos ilustrados na fig. 3.28, 3.29 e 3.30:

Ponto 1 à 1,110m

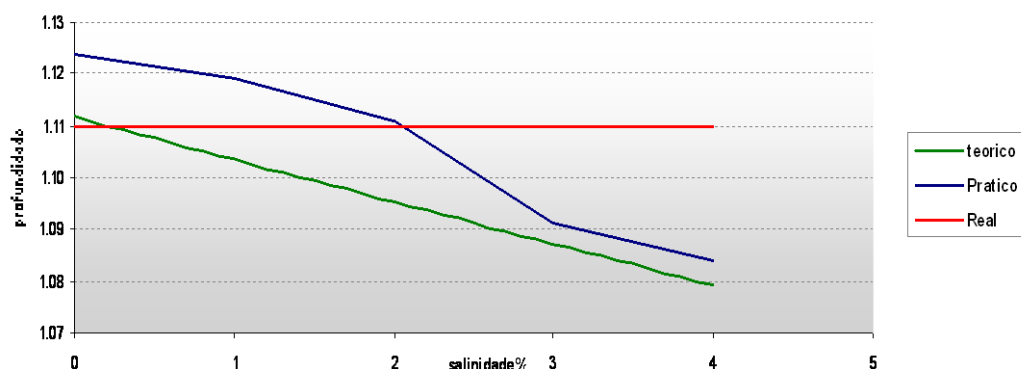


Fig. 3.28 – Comparação dos resultados do ponto1.

Ponto 2 à 1,625m

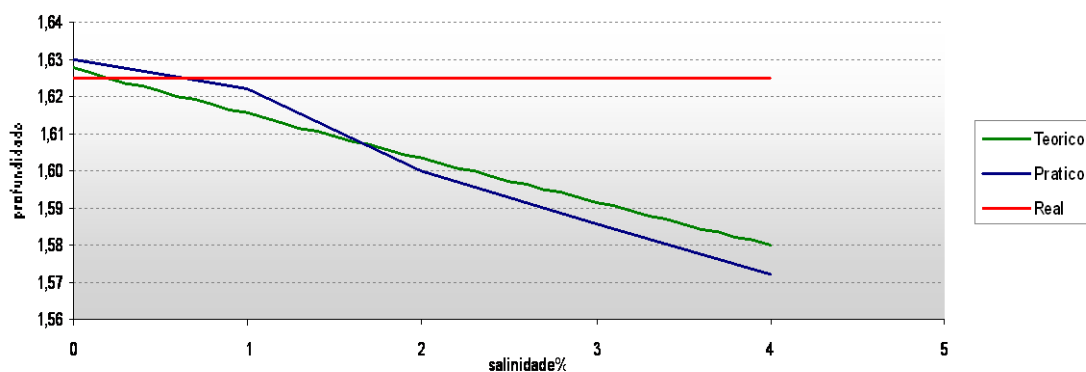


Fig. 3.29 – Comparação dos resultados do ponto2.

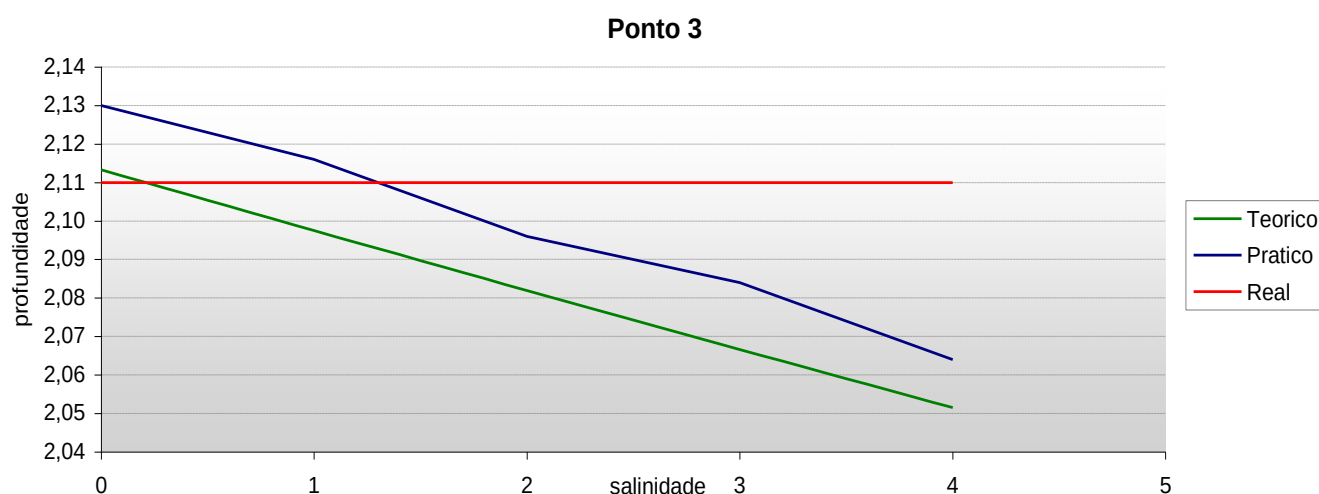
Ponto 3 a 2,110m

Fig. 3.30 – Comparação dos resultados do ponto 3.

Pode-se concluir que os resultados teóricos se aproximam bastante bem dos resultados obtidos em laboratório, já que em nenhuma leitura a diferença entre os valores teóricos e práticos se afastou mais de 2cm. Uma vez que ao Sonar está associado a um erro de 2 cm, conclui-se que os valores práticos foram coincidentes com os teóricos.

Comparando também os resultados reais e práticos, conclui-se que a uma temperatura de 22°C e para uma salinidade de 0‰, o Sonar está preparado para efectuar leituras sem erros.

3.4.2.3. VARIAÇÃO DA TURVAÇÃO DA ÁGUA

Um dos ensaios elaborados em laboratório para testar mais uma vez as capacidades do Sonar, foi a turvação do líquido na qual se encontrava o Sonar.

Teoricamente, as propriedades que interferem na propagação do som num meio líquido são a salinidade, temperatura, pressão e viscosidade, e nunca a turvação. Existiu no entanto a curiosidade em se verificar se realmente tal acontecia, uma vez que o Sonar é utilizado por vezes em altura de cheias, na qual o rio se encontra com grandes turvações.

Para elaborar tal ensaio em laboratório foram utilizados os seguintes materiais: um tubo de acrílico de 150mm de diâmetro externo, 144mm de diâmetro interno e de 3,60m de comprimento, um sensor de temperatura, o próprio Sonar e utilizou-se como material de turvação o filer de Calcário (pó fino resultante da moagem de calcário).

Falando agora no procedimento do ensaio, inicialmente encheu-se o tubo de água que se encontrava com uma turvação praticamente nula e progressivamente acrescentou-se filer de calcário para aumentar a turvação. Posteriormente será explicado, com mais detalhes o fenómeno de turvação. A figura seguinte representa o ensaio em laboratório da turvação (Fig. 3.31).



Fig. 3.31 – Ensaio em laboratório da turvação.

A turvação é uma medida da falta de transparência de uma amostra de água, isto é, do seu estado turvo. Deve-se à presença de minúsculas partículas, que podem ser plâncton, micro organismos, lama, argilas, limos, partículas de sílica ou matérias orgânicas. E é representada com a seguinte grandeza física NTU.

No ensaio elaborado, fez-se a leitura em três pontos de diferente cota para cada grau de turvação, foram realizados cinco níveis de turvação, níveis estes com as seguintes gramas de filer de calcário por litro: 1g/L, 2g/L, 3g/L, 4g/L, 7g/L.

Para medir o nível de turvação retirou-se uma amostra (Fig. 3.32) em cada nível de turvação e mediu-se com recurso a um turbidímetro (Fig. 3.33), obtendo-se o nível de turvação em NTU.

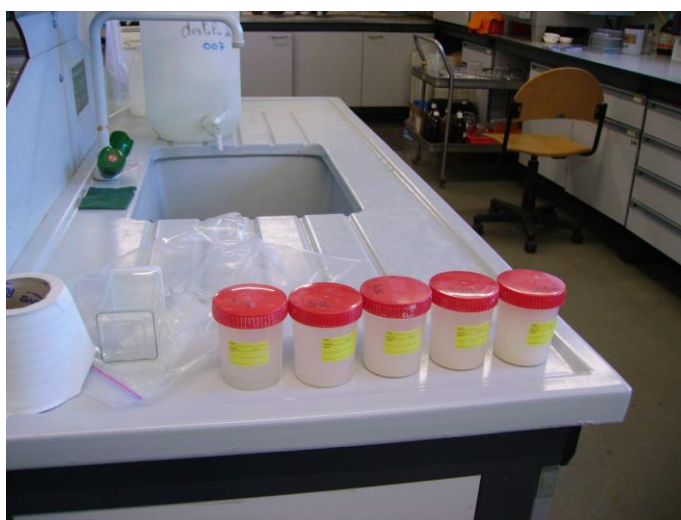


Fig. 3.32 – Amostras dos diferentes níveis de turvação.



Fig. 3.33 – Turbidímetro.

Os resultados obtidos em laboratório na leitura do Sonar, para vários níveis de turvação, a uma temperatura de 22°C, para os diferentes pontos, encontram-se evidenciados no gráfico seguinte:

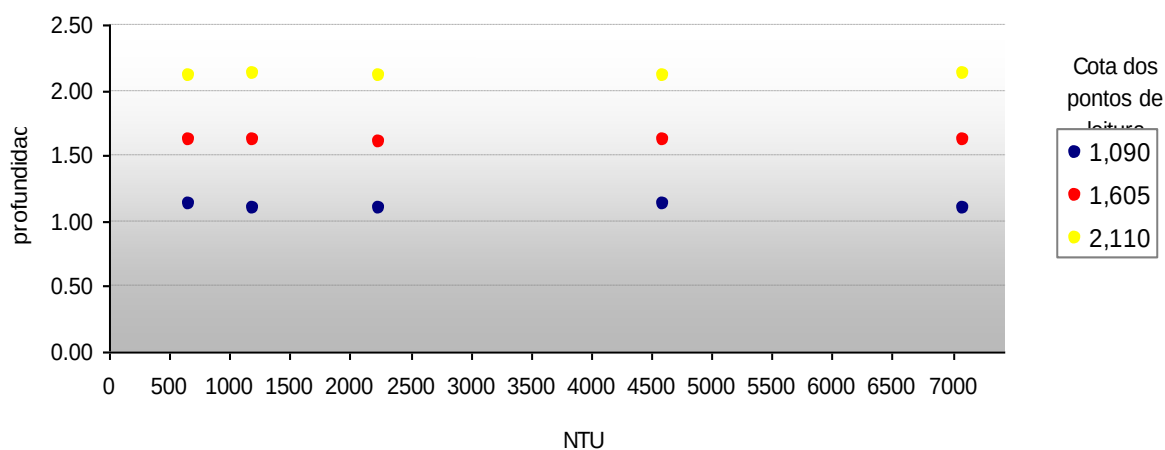


Fig. 3.34– Resultados do ensaio.

Observando o gráfico anterior, pode-se concluir que a turvação não interfere na leitura do Sonar. Passando agora a uma comparação entre diferentes resultados para os diferentes pontos, resultados esses: teóricos, práticos e reais. Os resultados teóricos baseiam-se teoricamente aos que se deviam obter pela leitura do Sonar, tendo como constante de 1490 m/s de velocidade e uma temperatura de 22°C; os resultados práticos, consistem nos obtidos em laboratório e por fim os resultados reais consistem na altura realmente a qual se encontra o Sonar.

Nos gráficos seguintes é efectuada a comparação entre os valores teóricos, prático e reais, para cada ponto.

Ponto 1 a 1,090 m

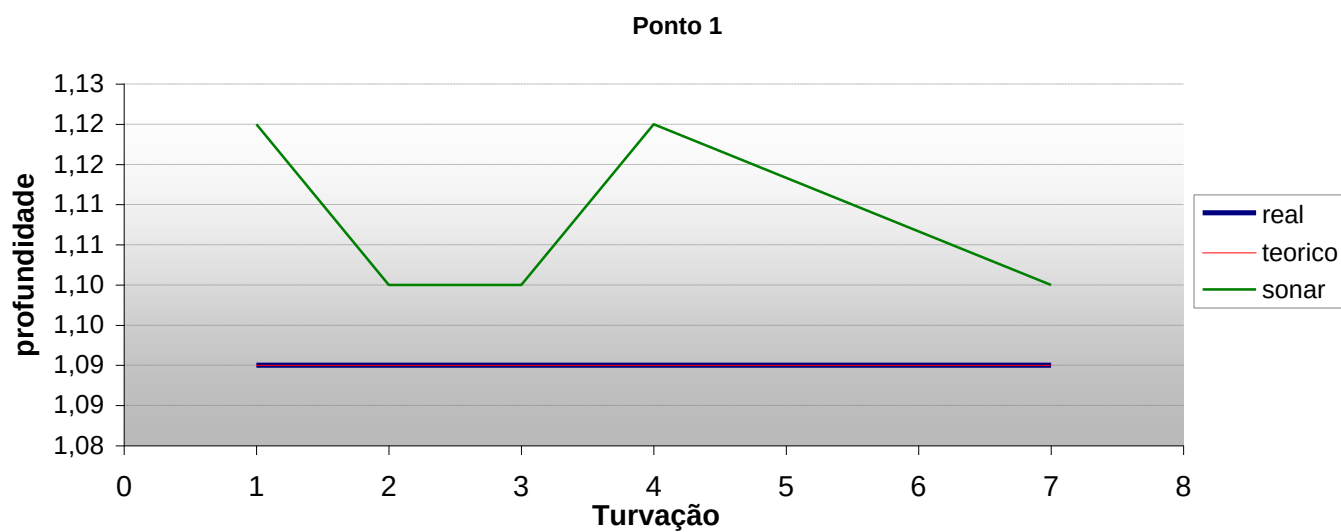


Fig. 3.35 – Comparação dos resultados do ponto1.

Ponto 2 a 1,605m

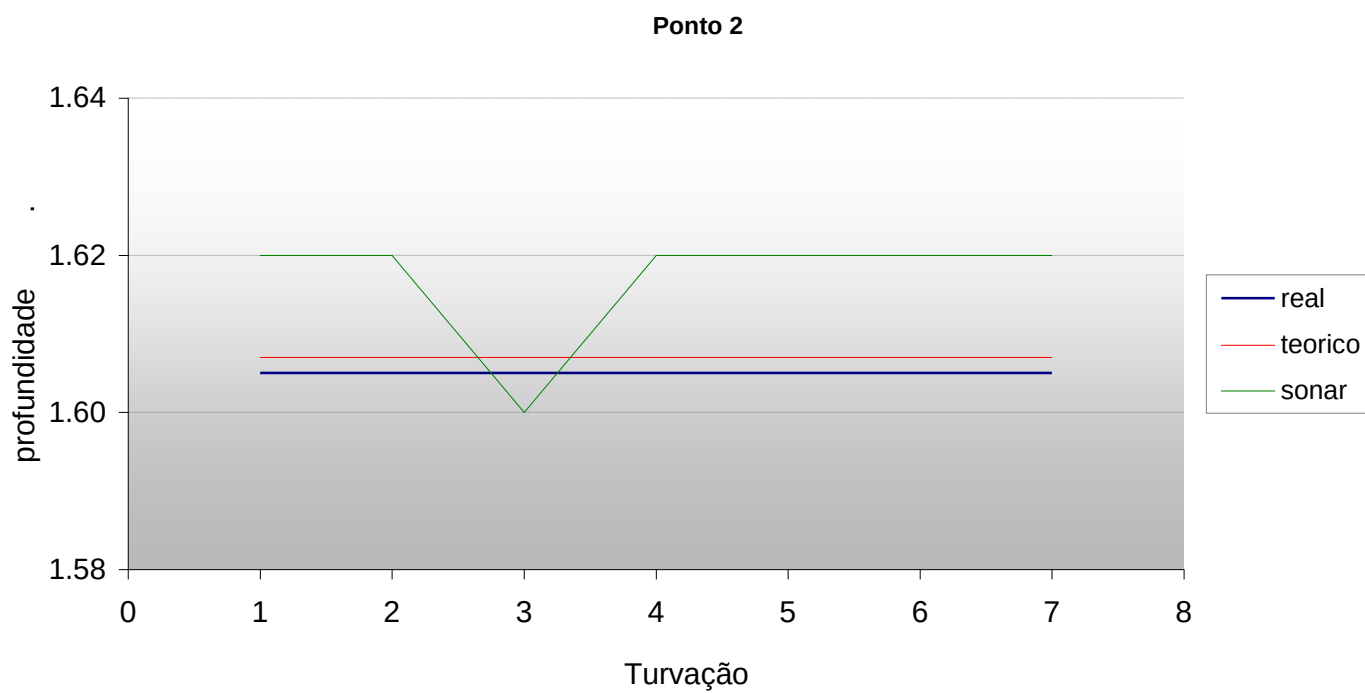


Fig. 3.36 – Comparação dos resultados do ponto 2.

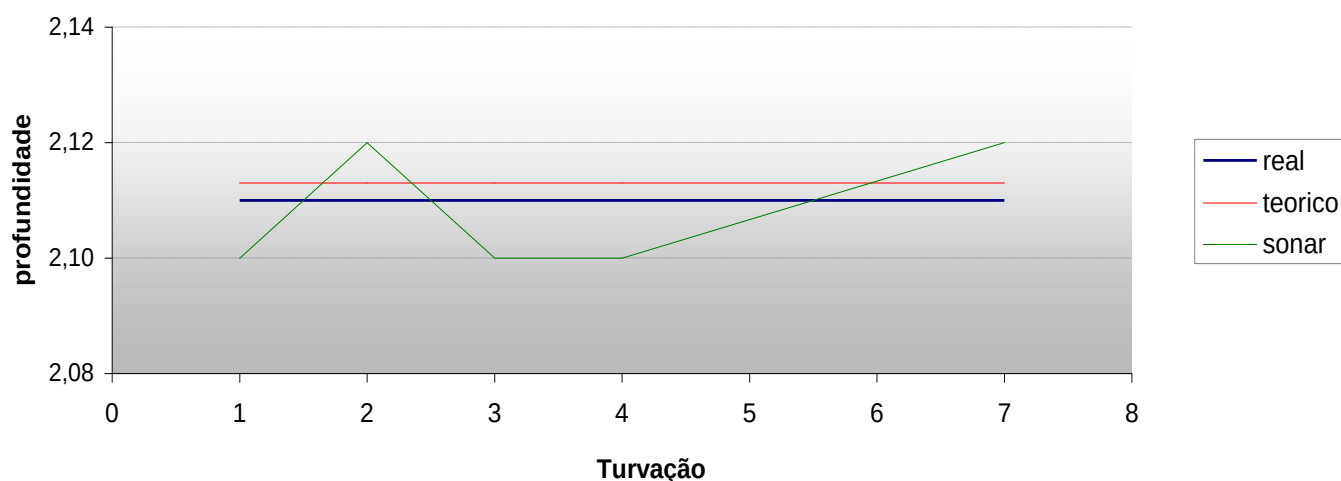
Ponto 3 a 2,110m**Ponto 3**

Fig. 3.37 – Comparação dos resultados do ponto 3.

Conclui-se que os resultados teóricos se aproximaram dos resultados obtidos em laboratório. Em nenhuma leitura a diferença entre os valores teóricos e práticos se afastaram mais de 2 cm, uma vez que o Sonar apresenta um erro de 2 cm. Os valores práticos foram coincidentes com os teóricos, e por sua vez os teóricos são idênticos aos reais.

3.4.3. ENSAIOS EM AMBIENTE FLUVIAL

Depois de se realizar todos os ensaios anteriormente descritos em laboratório, foram feitos testes em ambiente fluvial para se ter noção das leituras, diga-se agora em condições mais realistas. Para isso realizou-se um conjunto de leituras em diversos pontos do Rio Douro, na margem de Vila Nova de Gaia (Fig. 3.38)



Fig. 3.38 – Local do caías de Vila Nova de Gaia onde foram efectuados os testes.

O principal objectivo destes testes foi o de avaliar a capacidade do Sonar em transmitir correctamente a profundidade do leito do rio nos diferentes pontos seleccionados.

O procedimento do teste consistiu em avaliar a profundidade do rio com a ajuda de um fio suspenso e de uma escala graduada. De seguida verificou-se se tal profundidade era confirmada pelo Sonar, por sua vez o Sonar era preso a uma cantoneira metálica para ser possível controlar a sua verticalidade. Ilustra-se, deste modo, na figura seguinte o procedimento utilizado para a realização do teste.

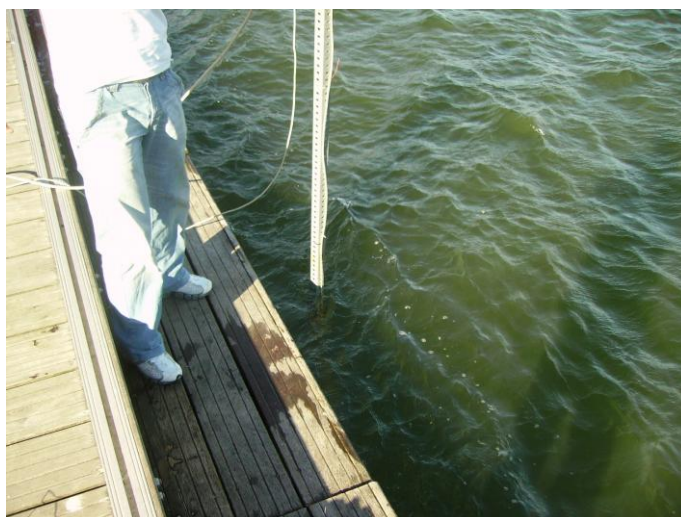


Fig. 3.39 – Procedimento do teste de profundidade em ambiente fluvial.

Na figura seguinte estão representados os diferentes pontos (de 1 a 7) nos quais se efectuaram as várias leituras:



Fig. 3.40 – Pontos do cais em que se efectuaram as leituras.

Resultados obtidos no teste fluvial foram os seguintes para cada ponto de leitura indicado na figura anterior.

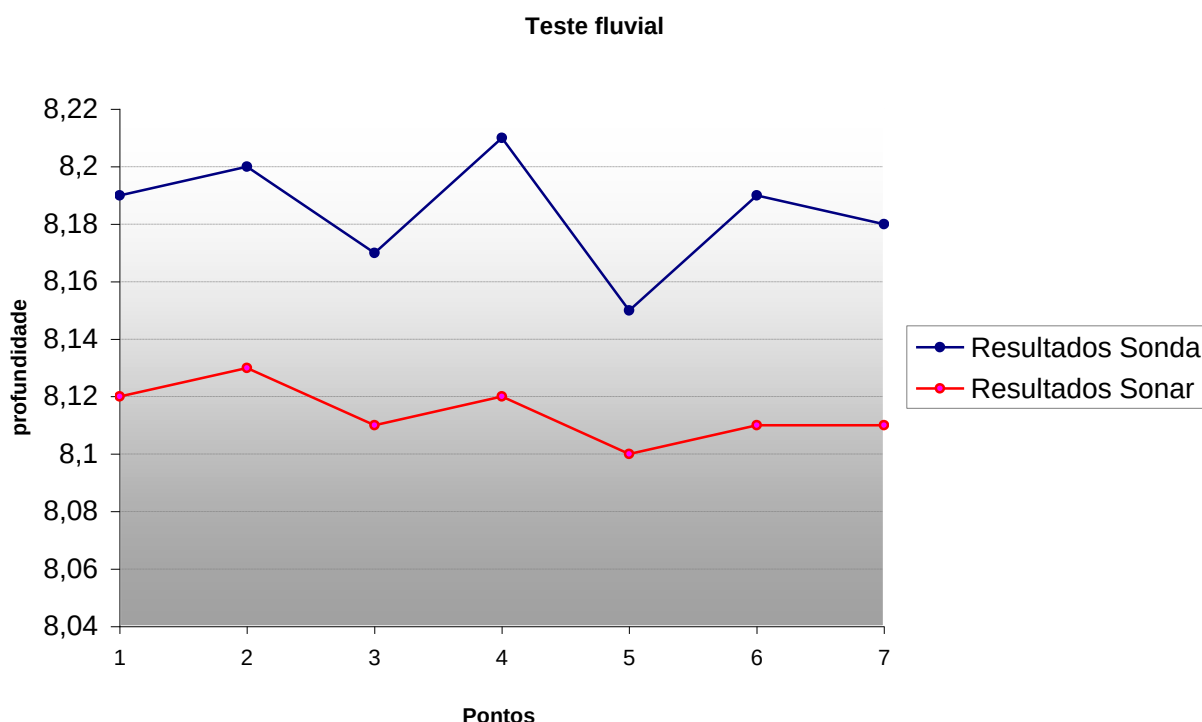


Fig. 3.41 – Resultados do teste fluvial.

Como se observa na figura anterior, os resultados não foram muito diferentes; a principal diferença que se verifica entre os resultados obtidos pela Sonda e dos resultados obtidos pelo Sonar, poderá ser devida à falta de precisão da Sonda que foi improvisada.

A falta de precisão da Sonda deve-se ao facto da sonda ser dotada de um fio muito flexível e devido à corrente do rio, se verifica um desvio da verticalidade. Do ensaio, não se podia garantir verticalidade da sonda, ao contrário do Sonar que se encontrava preso a uma cantoneira que garantia verticalidade. Mas conclui-se que o Sonar tem um bom desempenho em ambiente fluvial, uma vez que a água do rio Douro se encontrava a uma temperatura de cerca de 16°C.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os ensaios elaborados, tanto em laboratório como em campo, permitiram estudar a sensibilidade e estabilidade na utilização do Sonar, pode-se de uma maneira geral considerar o Sonar um sistema muito eficaz, para a medição da infraescavação como também para o acompanhamento da evolução da mesma.

Não se pode afirmar que o Sonar é um sistema sem condicionantes, como foi visto anteriormente se a temperatura for muito elevada ou muito baixa, vão existir erros de leitura. Também se passa o mesmo com o nível de salinidade. Existem casos em que os efeitos devidos ao nível de salinidade podem compensar os efeitos devido à temperatura ou vice-versa, observando-se o gráfico seguinte pode-se compreender melhor essa compensação.

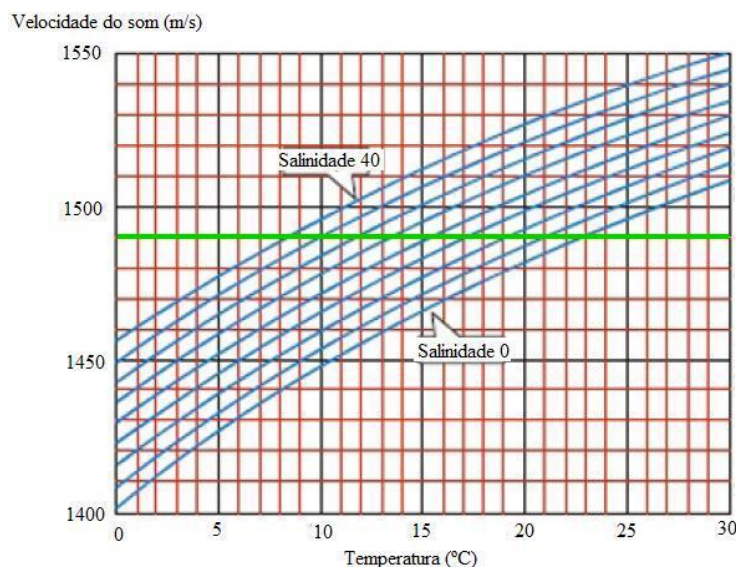


Fig. 3.42 - Velocidade do som em função da temperatura e da salinidade.

O Sonar está preparado para leituras em que a velocidade de propagação de uma onda sonora na água seja de 1490m/s (recta verde no gráfico anterior), logo se estiver presente um meio líquido em que o nível de salinidade é muito elevado de 40‰ e a uma temperatura baixa de 8,5°C, os efeitos da salinidade e da temperatura na propagação da onda vão-se auto compensar. Continuando a análise do gráfico, todos os casos em que o meio líquido no qual se vão efectuar as leituras se encontrarem em pontos no gráfico acima da recta verde existirá erro de leitura por defeito, enquanto se estiver em casos em que se encontra abaixo da recta verde existirá erros de leitura por excesso.

Passando a casos práticos que possam ocorrer em Portugal na medição ou até no acompanhamento dos efeitos da infraescavação ao longo do ano, em que a temperatura vai variar uma média de 7°C, mas já a salinidade dificilmente vai variar, por isso o erro cometido nas leituras durante o ano podem ser consideráveis. Esse erro pode ser corrigido simplesmente com um sensor de temperatura, fazendo-se o registo da temperatura da água no qual está submerso o Sonar, e tendo assim os registos do Sonar e da temperatura em simultâneo, pode-se assim facilmente corrigir cada leitura e compensando os efeitos da temperatura. O mesmo acontece para a salinidade, tendo o registo dos níveis de salinidade, os efeitos do mesmo nas leituras do Sonar podem ser corrigidos.

4

MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA PONTE DO PINHÃO

4.1 INTRODUÇÃO

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 atempadamente eventuais situações de colapso, aumentando deste modo a vida útil da obra. Neste contexto, a motivação para o desenvolvimento e aplicação de sistemas de monitorização está enquadrada por factores directamente relacionados com o comportamento e a segurança das estruturas, e com considerações de ordem económica.

O presente capítulo refere-se à instrumentação e observação do comportamento da Ponte do Pinhão (Fig. 4.1) durante duas fases de um ensaio de carga.



Fig 4.1 – Vista geral da Ponte do Pinhão.

Pretende-se essencialmente descrever as condições em que a ponte foi instrumentada e realizadas as diferentes fases do ensaio de carga, e apresentar os principais resultados da medição efectuada. Estes resultados são interpretados e discutidos com base num modelo numérico desenvolvido para o efeito.

Sendo assim, o presente capítulo é constituído pela introdução e por cinco sub capítulos organizados na seguinte sequência:

- Breve referência histórica aos principais acontecimentos.
- Descrição do sistema estrutural da ponte nas condições em que foi realizado o ensaio de carga.
- Descrição do sistema de medição instalado em obra para a obtenção de várias grandezas, tais como: extensões, deslocamentos verticais e horizontais, inclinações e temperatura, com vista ao acompanhamento do ensaio de carga;
- Descrição dos ensaios de carga, dos veículos utilizados, dos casos de carga e resultados obtidos para as diferentes fases do ensaio de carga.
- Apresentação e discussão dos diferentes resultados da monitorização do comportamento estrutural obtidos pelos vários sensores nas diferentes fases do ensaio de carga.

4.2 INTRODUÇÃO HISTÓRICA

A documentação disponível, não permite elaborar uma história completa da Ponte Metálica do Pinhão. Na realidade, só será possível referir alguns factos históricos, que nem sequer contemplam o início da sua construção, o projectista, o construtor, assim se apresenta a história que se conseguiu reunir.

Esta ponte sobre o rio Douro, encontra-se inserida na E.N. 323 ao km 31.604, único local de travessia do rio Douro entre as barragens da Régua e da Valeira. A sua construção foi da responsabilidade da Junta Autónoma de Estradas de Vila Real, apontando-se o ano de 1906 como ano da sua construção, não se sabendo quanto tempo decorreu e quando foi aberta ao trânsito. A ponte contribui de forma decisiva para a ligação dos concelhos de Tabuaço, S. João da Pesqueira, Sabrosa e Alijó, assumindo desta forma neste último, o Pinhão, lugar de maior importância.

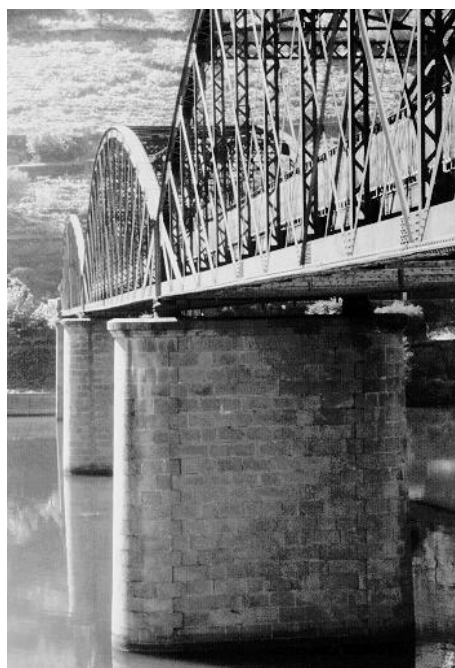


Fig. 4.2 – Vista da Ponte do Pinhão.

Não se sabendo exactamente quando, existem sinais que evidenciam intervenções posteriores na obra. Entre 1933 e 1936, esta ponte sofreu obras de reparação realizadas pela empresa L. Dargent Lda. tendo sido executado, nessa altura, o pavimento de betão armado, que terá substituído as travessas de madeira, que eram normalmente usadas na época. O uso de parafusos e soldadura em algumas ligações, levam também a concluir sobre uma intervenção posterior. Outra intervenção prende-se com a electrificação da obra. A ponte apresentava lado de montante alguns lampiões eléctricos, não havendo sinais de ter existido anteriormente outro tipo de candeeiros, o que acontecia em algumas das obras, cuja iluminação era efectuada com candeeiros a petróleo, aos quais era dedicado alguns cuidados na concepção, como é o caso da Ponte Luiz I.

Relativamente às intervenções de beneficiação da estrutura metálica como pintura, reforço ou limpeza, não é sabido quando ocorreram as intervenções a esse nível, se é que ocorreram. Em 2006 a Ponte do Pinhão sofreu um reforço estrutural, sendo o projecto da autoria do GEG (Gabinete de Engenharia e Geotecnia), certo é que passados 102 anos da sua construção continua a ser utilizada.



Fig.4.3 – Ponte do Pinhão actualmente.

4.3 SISTEMA ESTRUTURAL DA PONTE DO PINHÃO

A ponte do Pinhão é constituída fundamentalmente por uma estrutura metálica composta por chapas e cantoneiras e possui tabuleiro misto aço-betão, apresentando três pilares e dois encontros de alvenaria de pedra. Um dos encontros possibilita o acesso ao Pinhão, e o outro, ao Peso da Régua. A ponte desenvolve-se em quatro tramos (Fig. 4.4) com vãos de respectivamente 69,216m, 69,205m, 69,205m e 17,4m a partir do encontro do lado do Pinhão.

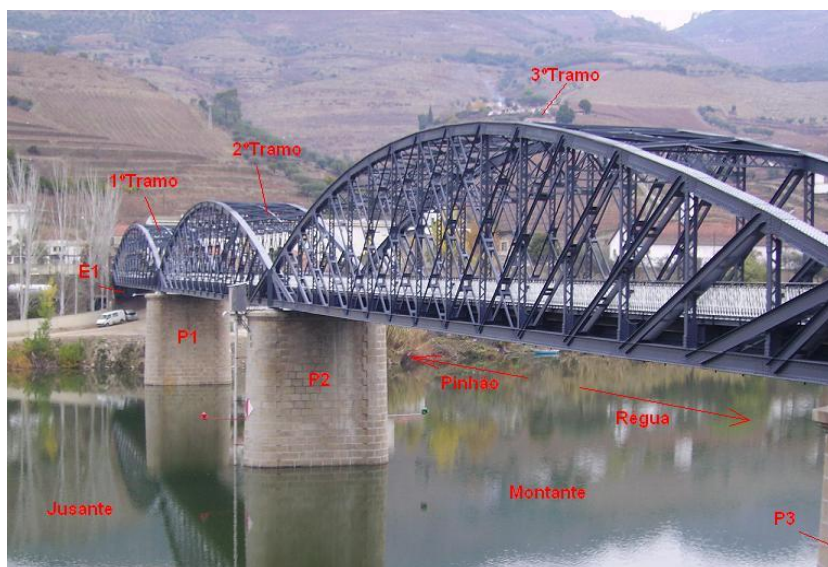


Fig. 4.4 – Ponte do Pinhão com indicações dos tramos e pilares.

O primeiro tramo está apoiado sobre o aparelho de apoio do encontro do lado do Pinhão (E1) e sobre o pilar P1, sendo que o apoio do pilar P1, ao contrário do apoio do encontro E1, permite deslocamentos horizontais. O segundo tramo está apoiado nos pilares P1 e P2, com liberdade de deslocamentos horizontais no apoio sobre o pilar P2. No terceiro tramo, os aparelhos de apoio estão localizados sobre os pilares P2 e P3, havendo liberdade de deslocamentos horizontais no apoio sobre o pilar P3.

O tabuleiro dispõe de uma largura total, medida pelo extradorso dos banzos, de aproximadamente 7,00m, com altura de 1,07m ao longo do eixo longitudinal, da qual 0,26m deve-se a camadas de betão armado (0,12m) e betuminoso (0,07m) depositadas sobre uma pré-laje de 0,07m. A região do tabuleiro destinada às duas faixas de rodagem ocupa 4,68m, e está apoiada transversalmente sobre cinco longarinas e longitudinalmente sobre dezassete carlingas, por tramo. Cada uma das vias é ladeada por um passeio de serviço com uma largura de 0,73m, e conta com um guarda-corpos lateral de 1,00m de altura. Cada longarina é constituída por chapas metálicas 400x7 e cantoneiras 70x70x7 unidas às chapas por rebites e reforçada por um IPE 270. Uma secção típica é formada por uma chapa e quatro cantoneiras, das quais duas são instaladas na extremidade superior e duas na inferior, formando uma secção em "I" que por sua vez foi reforçada por um perfil IPE 270, e colocado na parte superior da secção "I" formada pelas cantoneiras e chapas (Fig. 4.5). Todos os perfis e chapas representadas com um preenchimento a tracejado amarelo representam perfis e chapas já existentes antes do reforço da ponte, e todos aqueles apresentados a tracejado castanho tratam-se de perfis ou chapas de reforço.

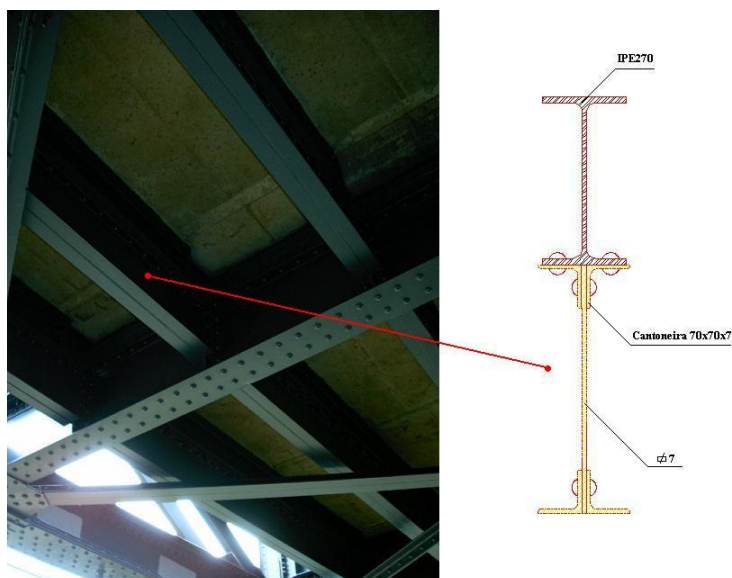


Fig.4.5 – Secção típica das longarinas.

As carlingas foram construídas utilizando-se chapas 600x10 e 250x9, cantoneiras 90x90x9 e reforçada por um perfil HEA 280. A secção típica de uma das carlingas é formada por uma chapa 600x10 com a maior dimensão na vertical, com a chapa 250x9 na horizontal e quatro cantoneiras 90x90x9 garantindo a união entre as chapas, mediante rebites. A secção original tem forma de "I" e por sua vez foi reforçada por um perfil HEA 280, que foi colocado na parte superior do perfil "I" anteriormente referido (Fig. 4.6).

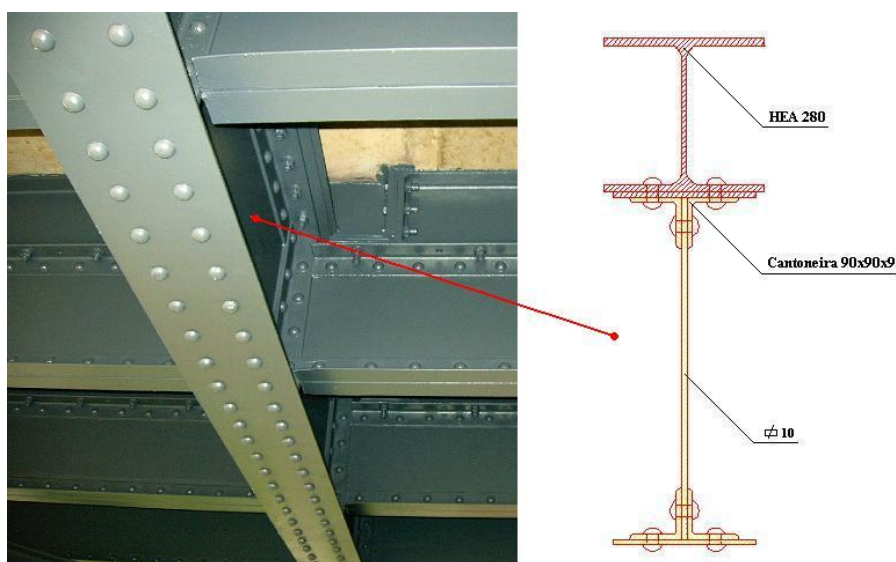


Fig. 4.6 – Secção típica das carlingas.

Entre cada par de carlingas existem dois elementos de contraventamentos dispostos em forma de "X". Cada contraventamento inferior é constituído por duas cantoneiras 100x100x10 unidas por rebites, dando origem a uma secção "T" (Fig. 4.7).

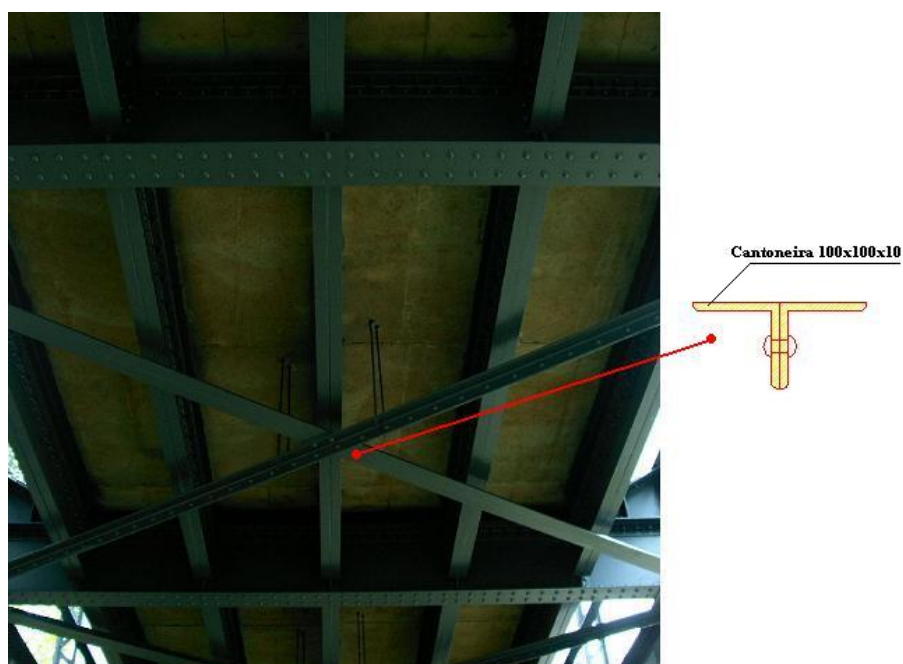


Fig. 4.7 – Secção típica dos contraventamentos.

Em cada tramo existe duas vigas longitudinais nas quais se apoiam as carlingas, que dão apoio às longarinas onde se apoia a laje do tabuleiro. As duas vigas longitudinais são constituídas por uma corda inferior e uma corda superior, as cordas inferiores são formadas por chapas 450x9 e 500x7, cantoneiras 90x90x10 e foram reforçadas por perfis LNP 150x100x10 (Fig. 4.8).

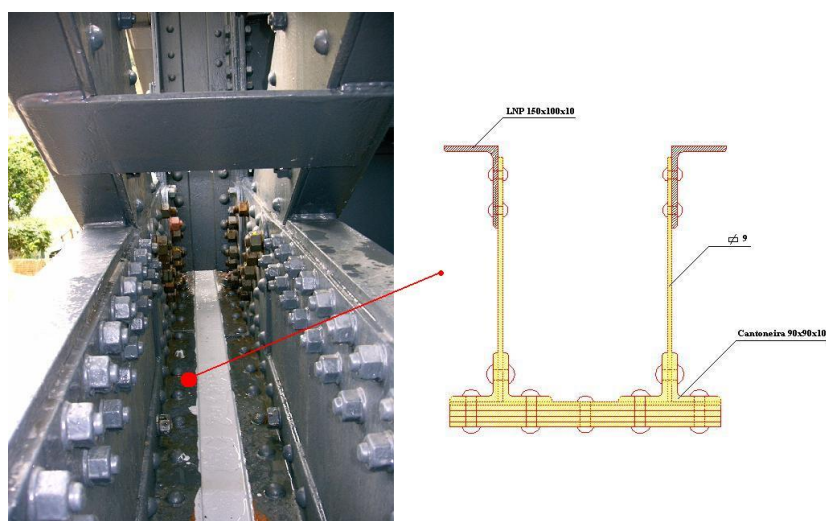


Fig. 4.8 – Secção típica das cordas inferiores.

As duas cordas superiores de cada tramo são formadas por chapas 450x9, 500x7, 460x7, 70x70x7, cantoneiras 90x90x10 e foram reforçadas por LNP 150x100x10 e chapas 70x7 (Fig.4.9).

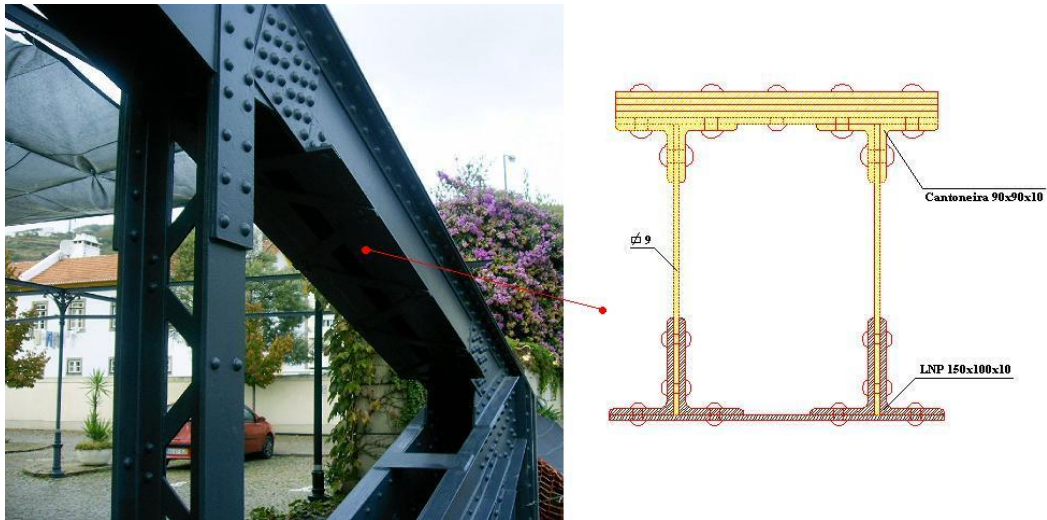


Fig. 4.9 – Secção típica das cordas superiores.

Em cada alinhamento, por tramo, a ligação entre a corda inferior e a corda superior é feita mediante dezassete montantes e vinte e duas diagonais. Os montantes são formados a partir da combinação de chapas de 9mm e 10mm de espessura, com altura variável, e cantoneiras de variadas dimensões e alguns desses montantes foram reforçados com chapas de 10mm (Fig.4.10).

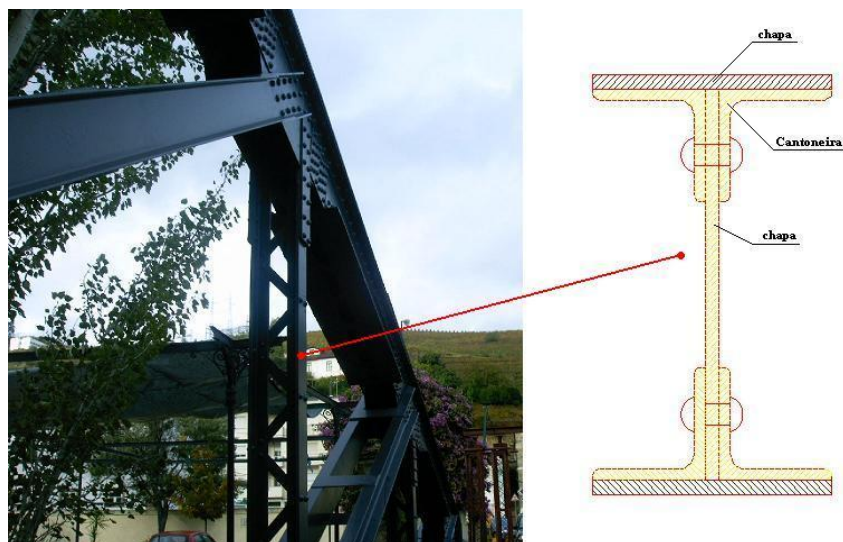


Fig. 4.10 – Secção típica os montantes.

As diagonais são formadas a partir da combinação de dois perfis UNP de variadas dimensões, dispostos em paralelo e espaçados entre si (Fig. 4.11).

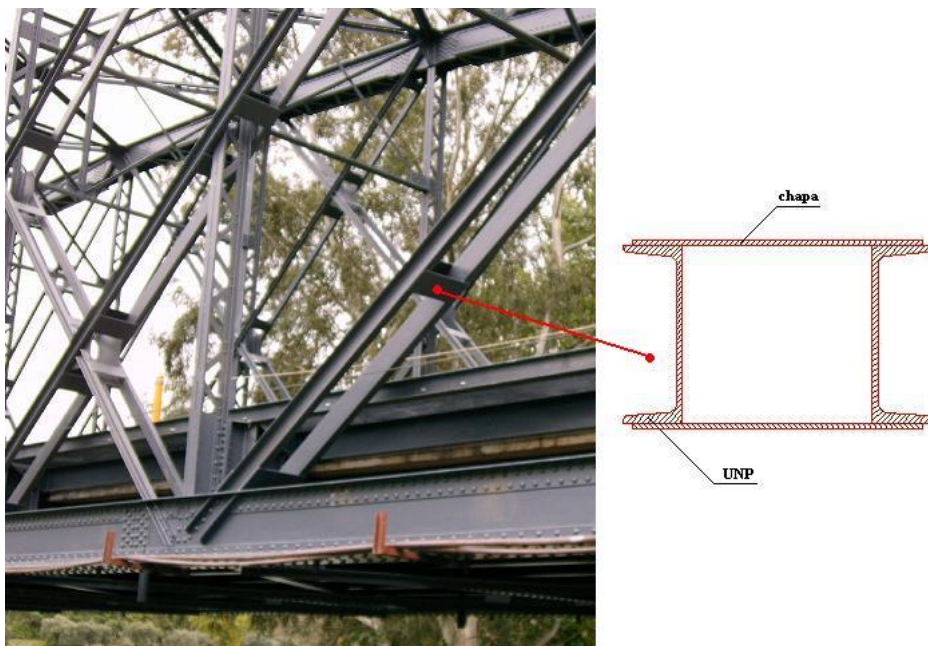


Fig. 4.11 – Secção típica das diagonais.

A união entre os arcos de cada tramo é assegurada por contraventamentos superiores, compostos por diagonais e cantoneiras de variadas dimensões, os quais unem os montantes dos lados jusante e montante, da quarta à décima quarta posição (Fig. 4.12).



Fig. 4.12 – Contraventamento superior.

4.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO

4.4.1 INTRODUÇÃO

Efectuou-se uma observação do comportamento estrutural da Ponte do Pinhão, dividida em duas fases, a primeira fase do ensaio de carga foi elaborada no dia 29 de Março de 2007 e a segunda fase do ensaio foi realizada no dia 17 de Janeiro de 2008.

Na observação do comportamento da Ponte do Pinhão durante o ensaio de carga procedeu-se à medição de vários tipos de grandezas nomeadamente, deslocamentos verticais e horizontais, rotações, temperatura e extensões. Posteriormente será indicado quais os sensores utilizados para a medição de cada grandeza em cada umas das fases do ensaio.

Foi utilizado um sistema de aquisição e registo integrado que permitiu a medição automática e simultânea das grandezas, com o mínimo de intervenção de operadores. Daí que grande parte dos sensores utilizados são eléctricos, quer alimentados directamente a partir do sistema de aquisição, como é o caso dos sensores de pressão, e dos sensores de temperatura, quer com alimentação própria, como é o caso dos LVDT's. Toda a instrumentação foi testada e calibrada antes da realização do ensaio.

A selecção dos extensómetros e dos materiais de aplicação e de ligação teve em atenção a necessária durabilidade da instalação, as condições ambientais a que a instalação estaria sujeita e a distância dos extensómetros ao sistema de aquisição.

Os sensores utilizados na medição de deslocamentos verticais foram os sensores de pressão e comparador eléctrico, já para a medição de deslocamentos horizontais foram utilizados LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Posteriormente será referido com mais cuidado cada um destes sensores.

4.4.2 MEDIÇÃO DAS EXTENSÕES

4.4.2.1 EXTENSÓMETROS UTILIZADOS

As extensões foram medidas na segunda fase do ensaio de carga. Para a sua medição foram colados transdutores à superfície do aço, em secções pré-definidas, com extensómetros de resistência eléctrica de 350ohm. Os extensómetros fazem parte do equipamento de monitorização permanente.

4.4.2.2 LOCALIZAÇÃO E ILUSTRAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS INSTALADOS EM OBRA

Os extensómetros eléctricos foram colados aos pares para comparação das leituras e de forma a captar algum efeito de flexão, eventualmente existente. Foram instrumentados com extensómetros eléctricos dezasseis secções do 1º tramo, duas secções no 2º tramo e por último duas secções no 3º tramo, com 2 extensómetros por secção, sendo distribuídos a jusante e montante. A Figura 4.13 esquematiza a localização do lado montante e lado jusante.

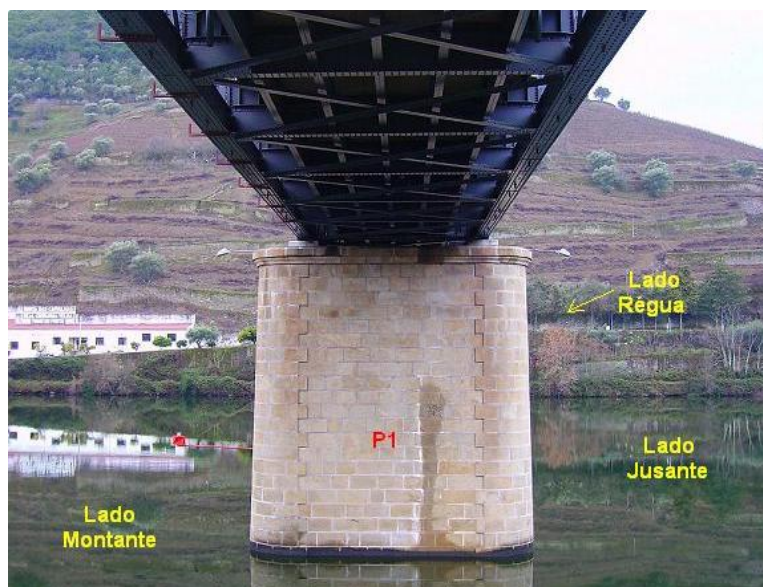


Fig. 4.13 – Localização de montante e jusante.

Na figura 4.14 é apresentada a disposição dos extensómetros nas diagonais, montantes e nas cordas superior e inferior, do lado de montante no 1º tramo.

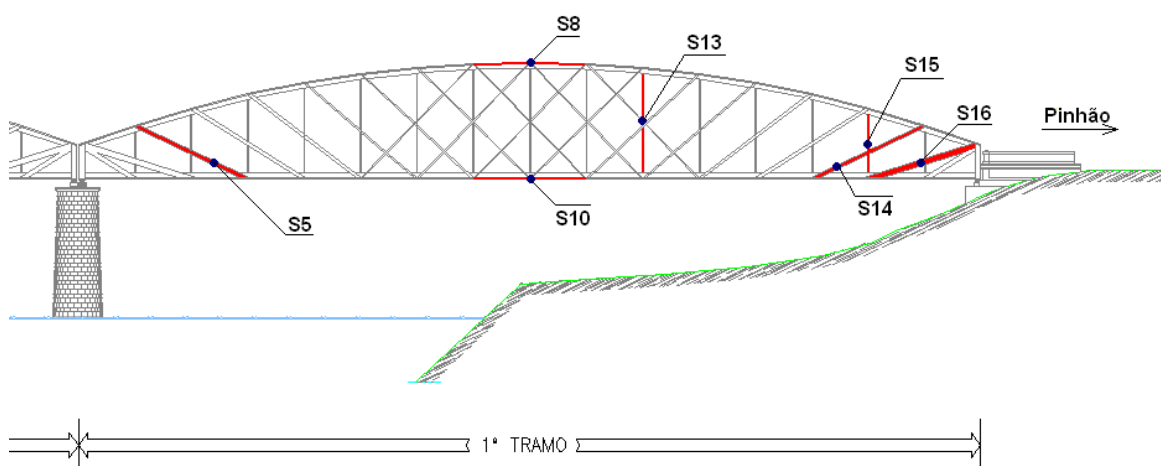


Fig. 4.14 - Extensómetros instalados nas secções S5, S8, S10, S13 a S16 (montante).

Na figura 4.15 é apresentada a disposição dos extensómetros nas cordas superior e inferior, do lado de jusante no 1º tramo.

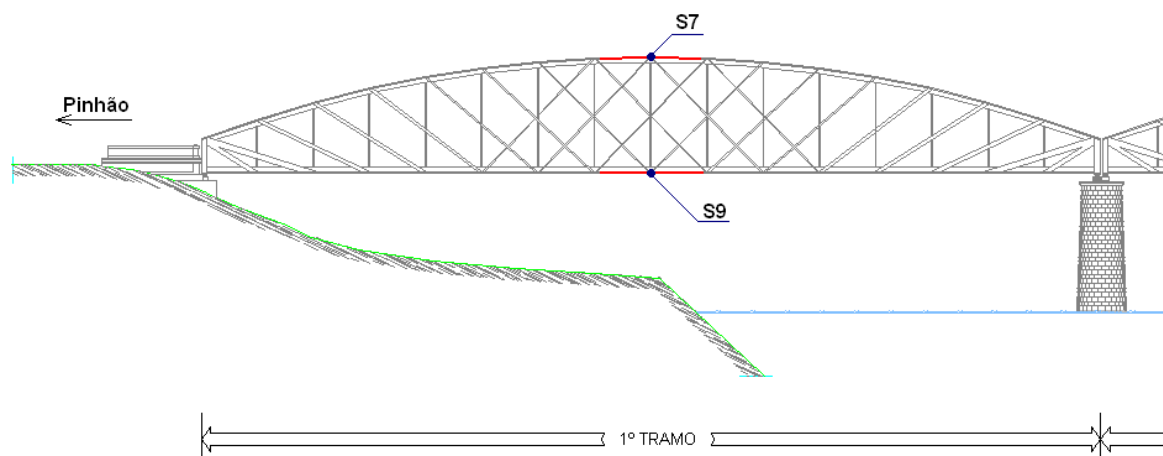


Fig. 4.15 - Extensómetros instalados nas secções S7, S9 (jusante).

Na figura 4.16 é apresentada a disposição dos extensómetros em cada corda inferior, do lado de montante e jusante no 2º tramo.

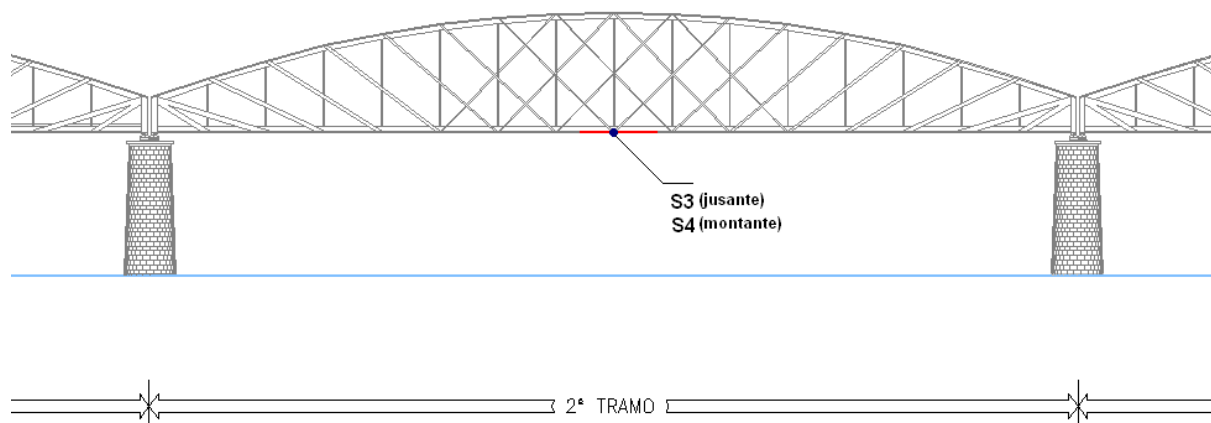


Fig. 4.16 - Extensómetros instalados nas secções S4.

Na figura 4.17 é apresentada a disposição dos extensómetros em cada corda inferior, do lado de montante e jusante, no 3º tramo.

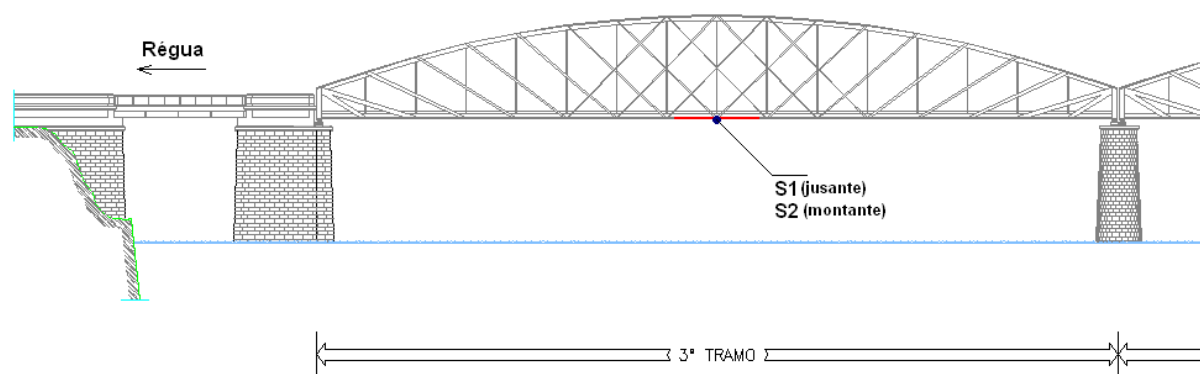


Fig. 4.17 - Extensómetros instalados nas secções S2.

A figura 4.18 apresenta a planta inferior do primeiro tramo, com a localização de algumas secções instrumentadas com extensómetros.

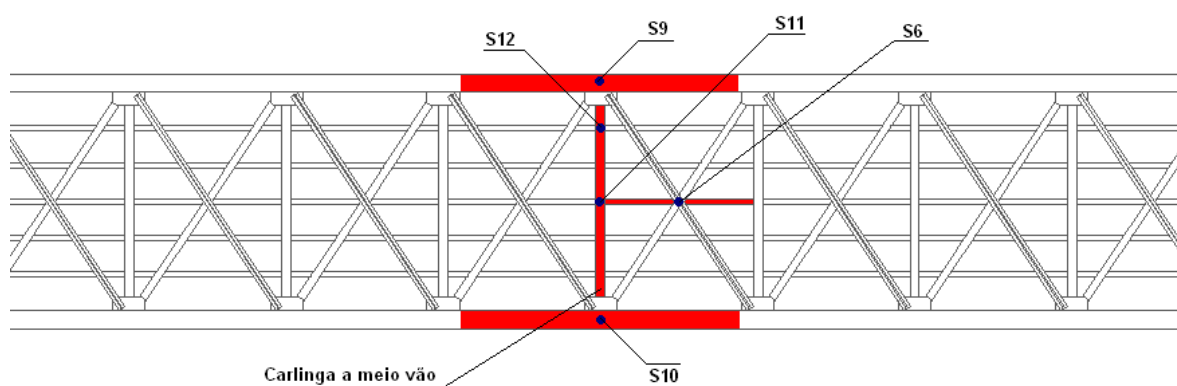


Fig. 4.18 - Extensómetros instalados nas secções S6 e de S9 a S12 (1ºtramo).

Extensómetros instalados na secção S1 a secção S4

Da secção S1 à secção S4 foram instalados dois extensómetro em cada secção, posicionados em todas as secções na mesma posição, como ilustram as figuras seguintes.

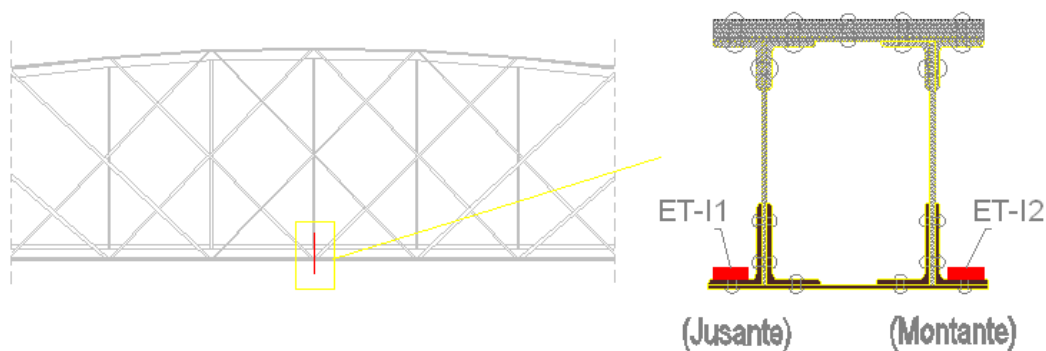


Fig 4.19 — Localização dos extensómetros instalados na secção S1 a S4.



Fig. 4.19 — Ilustração dos extensómetros da secção S1 a S4.

Extensómetros instalados na secção S5

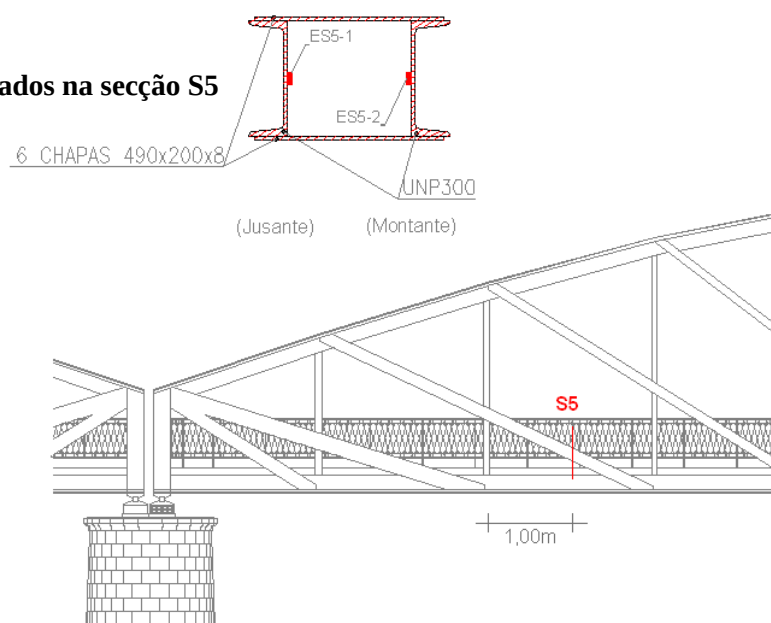


Fig 4.20 — Localização dos extensómetros instalados na secção S5.



Fig. 4.21 — Ilustração dos extensómetros da secção S5.

Extensómetros instalados na secção S6

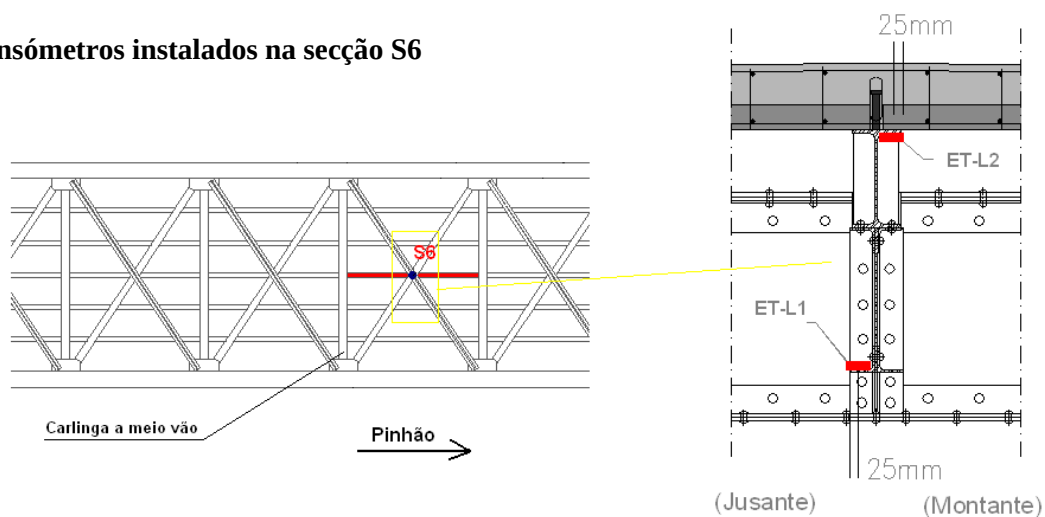


Fig 4.22 — Localização dos extensómetros instalados na secção S6.



Fig. 4.23 — Ilustração dos extensómetros da secção S6.

Extensómetros instalados na secção S7

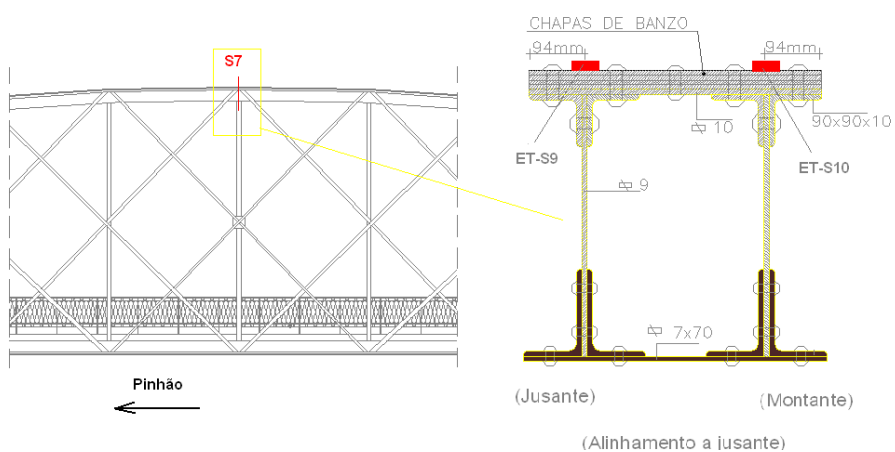


Fig. 4.24 — Localização dos extensómetros instalados na secção S7.



Fig. 4.25 — Ilustração dos extensómetros da secção S7.

Extensómetros instalados na secção S8

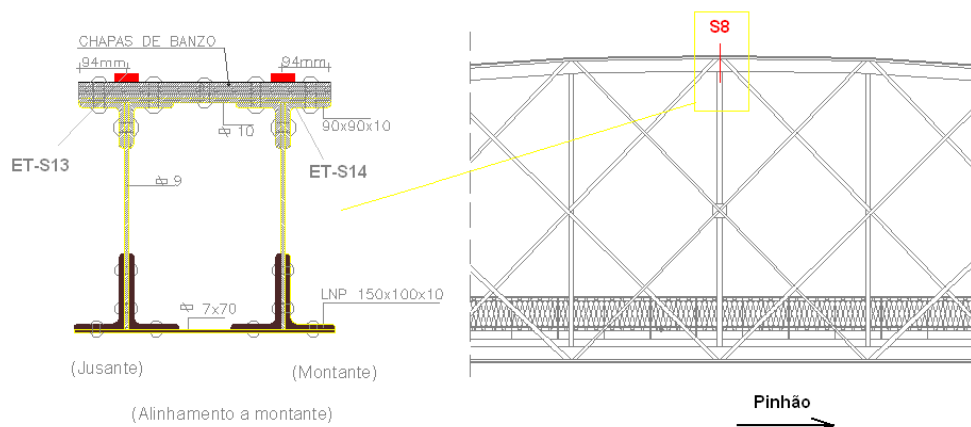


Fig.4.26 — Localização dos extensómetros instalados na secção S8.



Fig. 4.27 — Ilustração dos extensómetros da secção S8.

Extensómetros instalados na secção S9

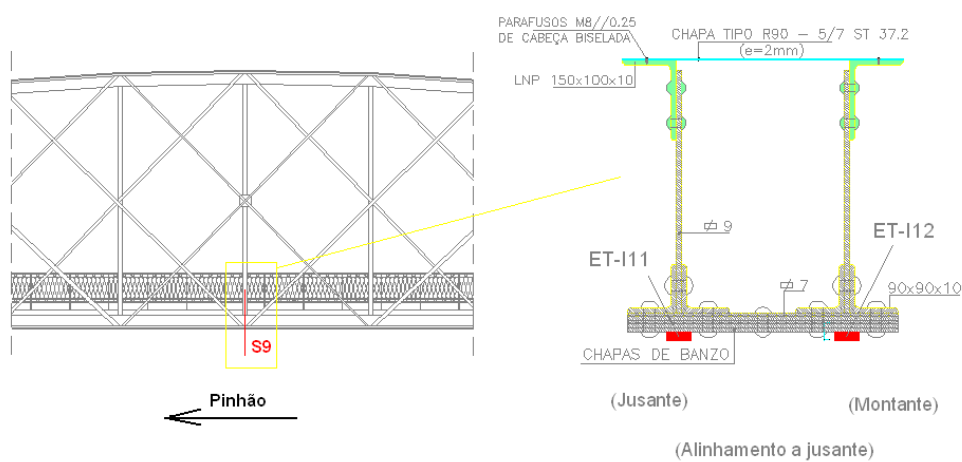


Fig 4.28 — Localização dos extensómetros instalados na secção S9.

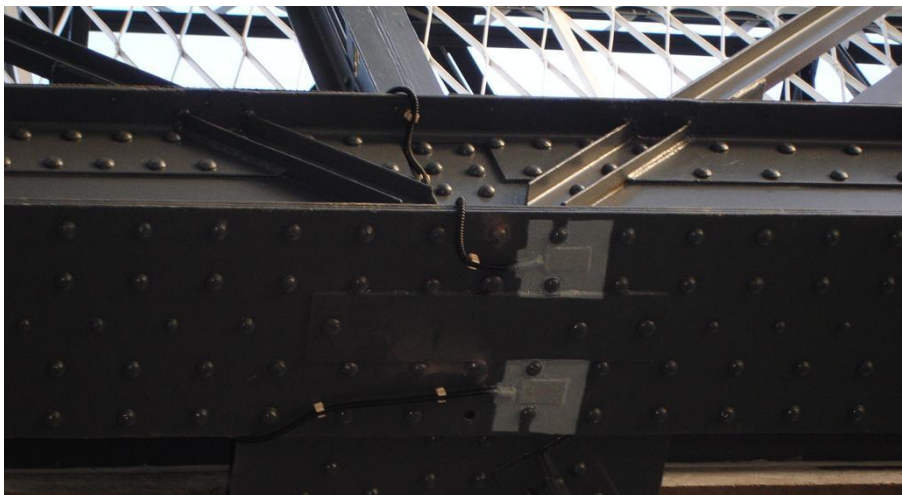


Fig. 4.29 — Ilustração dos extensómetros da secção S9.

Extensómetros instalados na secção S10

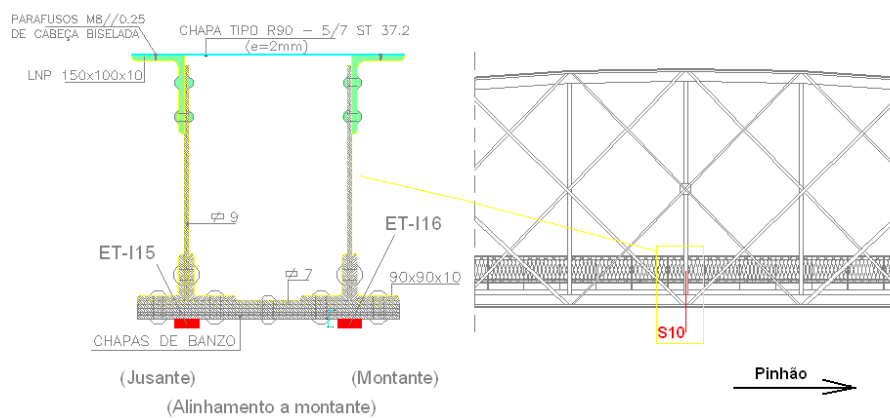


Fig 4.30 — Localização dos extensómetros instalados na secção S10.



Fig. 4.31 — Ilustração dos extensómetros da secção S10.

Extensómetros instalados na secção S11

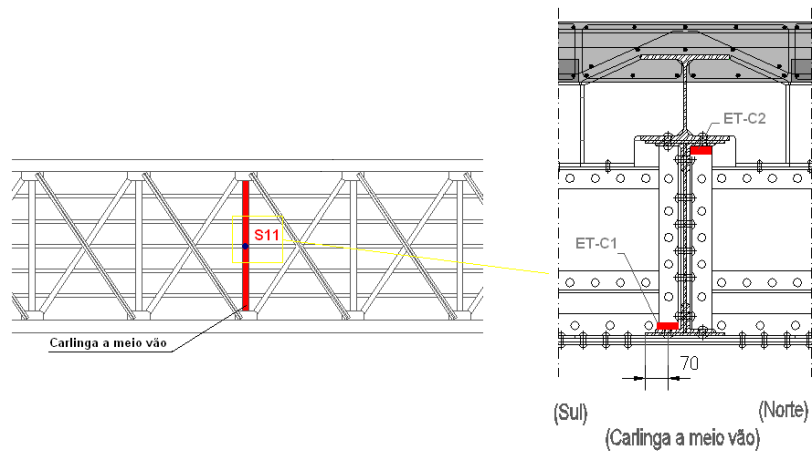


Fig 4.32 — Localização dos extensómetros instalados na secção S11.

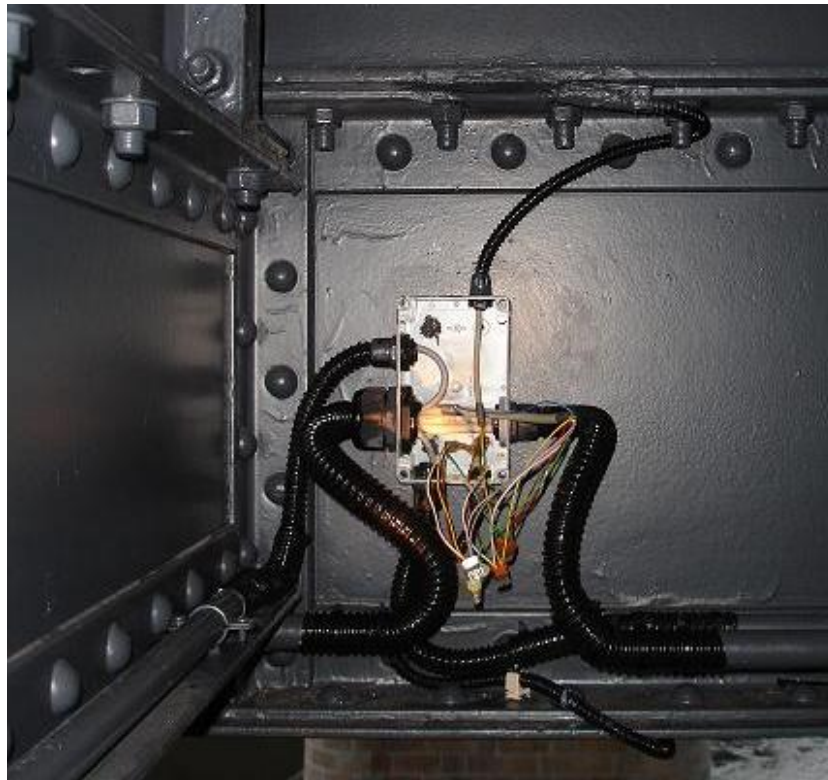


Fig. 4.33 — Ilustração dos extensómetros e da caixa de ligação da secção S11.

Extensómetros instalados na secção S12

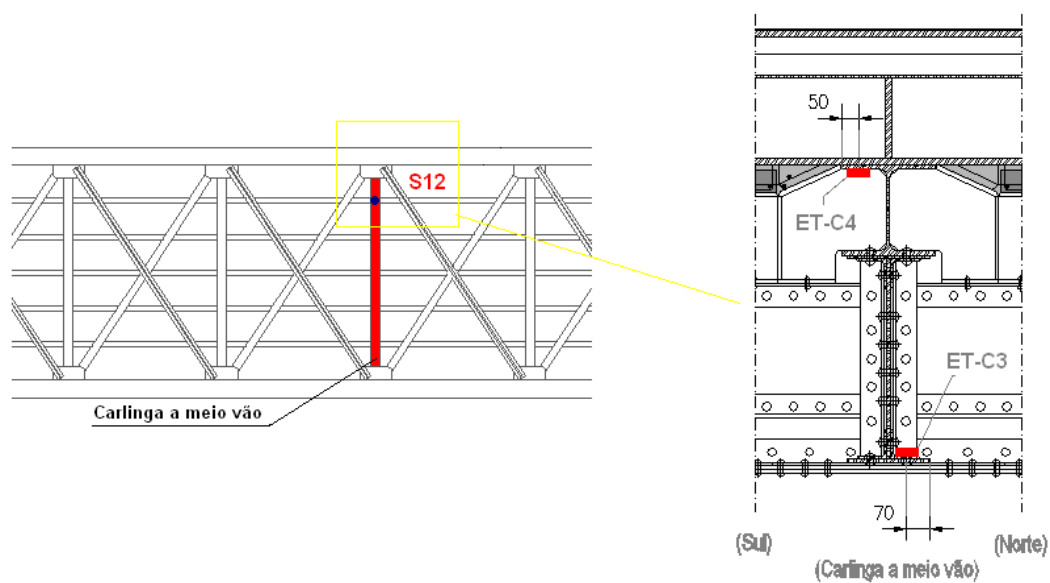


Fig. 4.34 — Localização dos extensómetros instalados na secção S12.



Fig. 4.35 — Ilustração dos extensómetros da secção S12.

Extensómetros instalados na secção S13

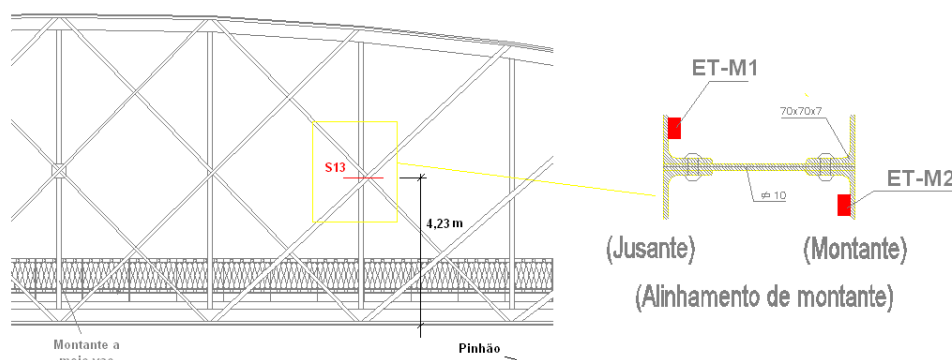


Fig 4.36 — Localização dos extensómetros instalados na secção S13.



Fig. 4.37 — Ilustração dos extensómetros da secção S13.

Extensómetros instalados na secção S14

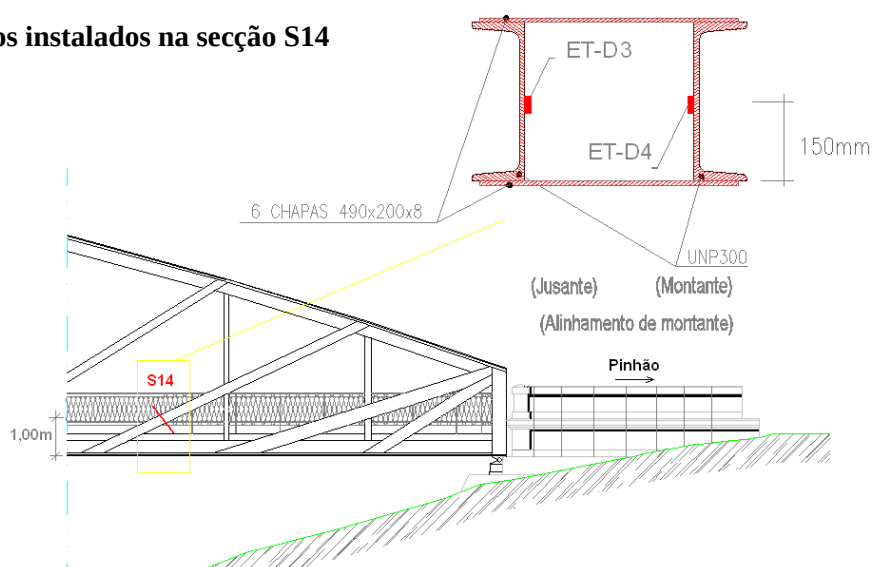


Fig 4.38 — Localização dos extensómetros instalados na secção S14.

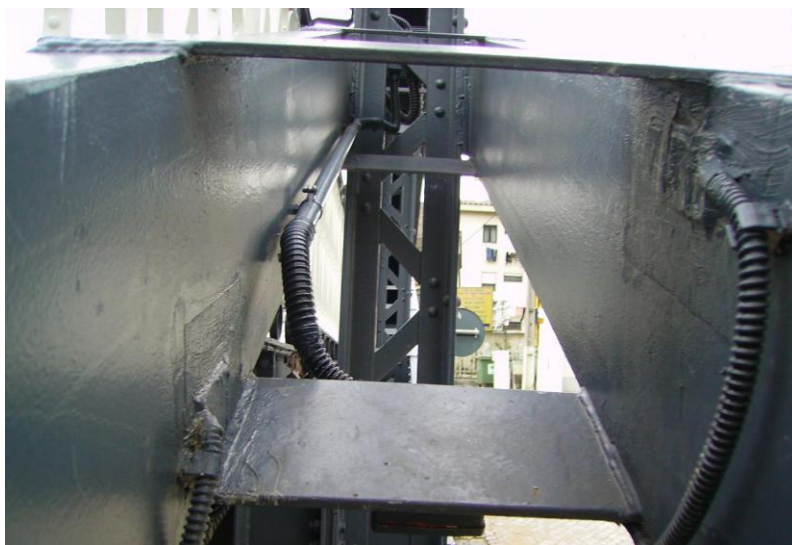


Fig. 4.39 — Ilustração dos extensómetros da secção S14.

Extensómetros instalados na secção S15

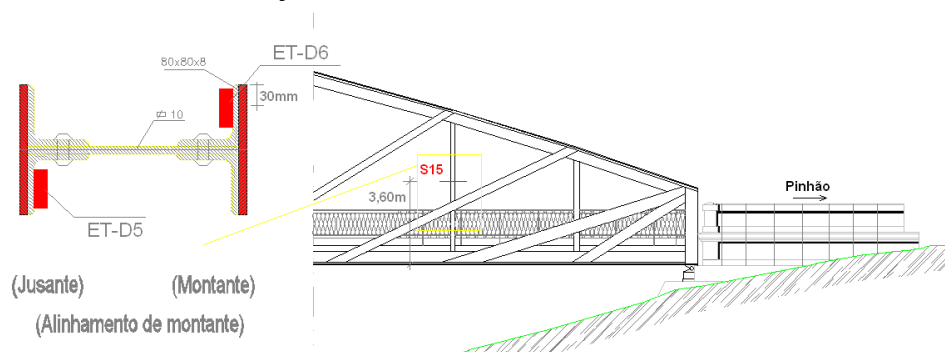


Fig. 4.40 — Localização dos extensómetros instalados na secção S15.



Fig. 4.41 — Ilustração dos extensómetros da secção S15.

Extensómetros instalados na secção S16

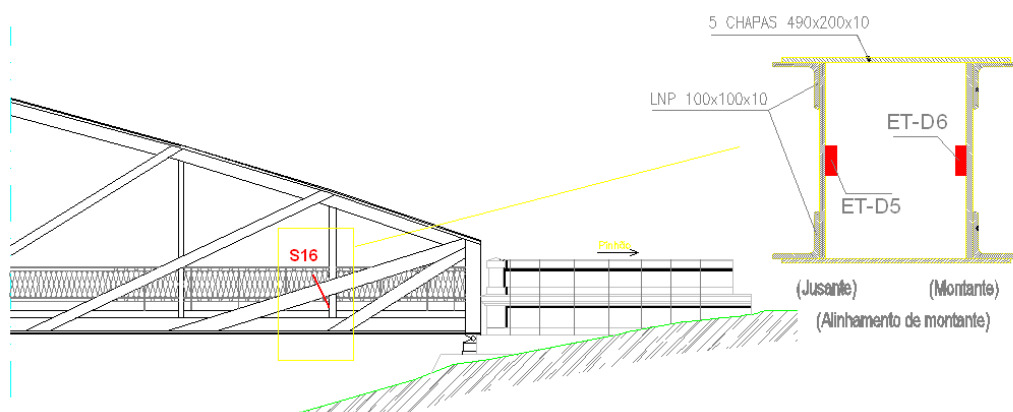


Fig. 4.42 — Localização dos extensómetros instalados na secção S16.



Fig. 4.43 — Ilustração dos extensómetros da secção S16.

4.4.3 MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Na medição dos deslocamentos verticais foram utilizados três sistemas distintos, um sistema de nivelamento hidrostático (sensores de pressão), um comparador eléctrico e um LVDT. Na primeira fase do ensaio de carga utilizaram-se os sensores de pressão e o comparador eléctrico. Na segunda fase do ensaio de carga utilizou-se apenas um LVDT. Estes sensores fazem parte da instrumentação utilizada apenas nas diferentes fases do ensaio de carga.

4.4.3.1 SENSORES DE PRESSÃO

Na Ponte do Pinhão procedeu-se à instalação de um circuito hidráulico constituído por dois reservatórios, fixados um em cada encontro (onde se considera desprezável o deslocamento vertical). Instalaram-se sensores de pressão em vários pontos, nos quais se pretende medir deslocamentos verticais na estrutura e também junto aos reservatórios para servirem de referência. Posteriormente será definidos a sua localização com mais pormenor.

4.4.3.2 LOCALIZAÇÃO E ILUSTRAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO

Foram medidos deslocamentos verticais a meio vão nos três tramos do tabuleiro, do lado de jusante e do lado montante. No total foram instalados seis sensores de pressão nos pontos de medição de deslocamentos verticais e dois sensores de pressão de referência. Da figura 4.44 à figura 4.48 apresenta-se a localização e a ilustração dos diversos sensores de pressão instalados.

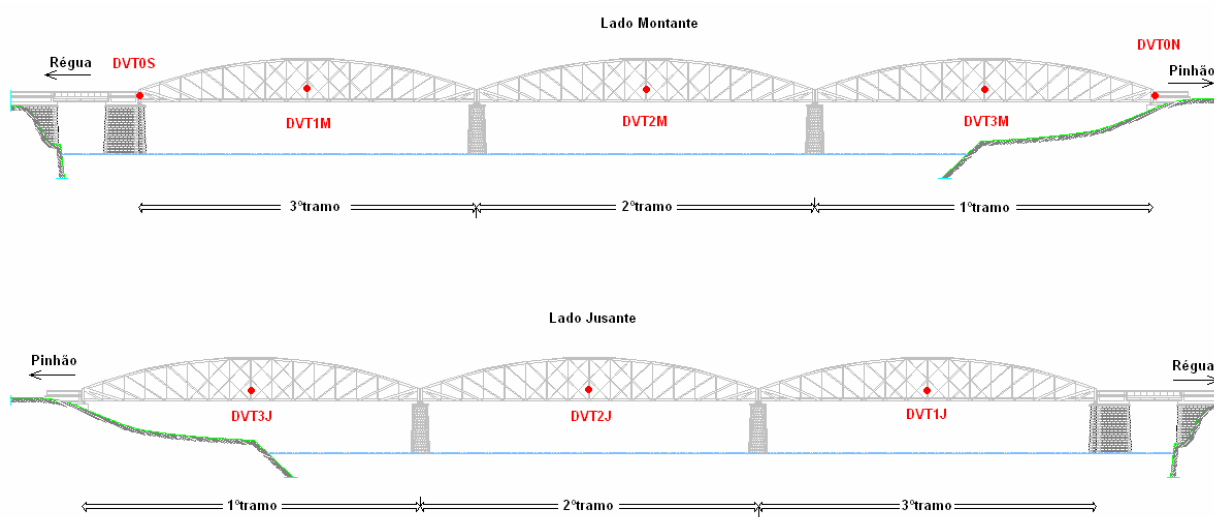


Fig. 4.44 - Localização dos diversos sensores de pressão instalados.

Como se verifica foram usados dois sensores de pressão de referência, sensores estes com a designação de DVT0S e DVT0N. Melhor dizendo o circuito hidráulico instalado na Ponte do Pinhão está dividido em dois sistemas distintos, ou seja, os seis sensores de pressão instalados para medir deslocamentos verticais, três deles (DVT1J, DVT1M, DVT2M) tem como sensor de referência o sensor designado por DVT0S e os restantes sensores (DVT2J, DVT3J, DVT3M) têm como sensor de referência o DVT0N.

Sensores de deslocamento DVT0S e DVT0N, e correspondentes reservatórios



Fig. 4.45 - Ilustração dos sensores de pressão de referência DVT0S e DVT0N.

Sensores de deslocamento DVT1J e DVT2J

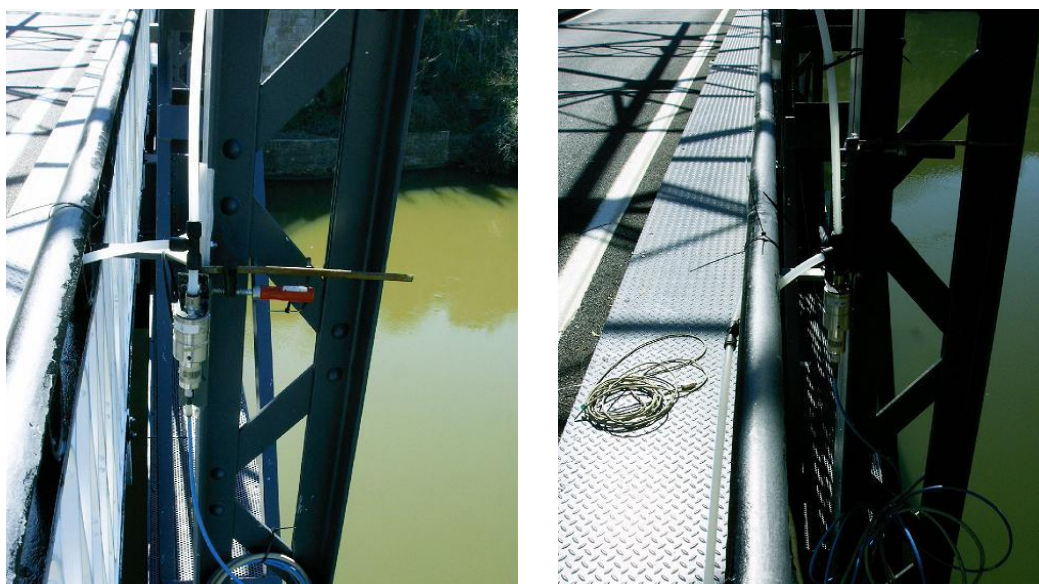


Fig. 4.46 - Ilustração dos sensores de pressão DVT1J e DVT2J.

Sensores de deslocamento DVT3J e DVT1M

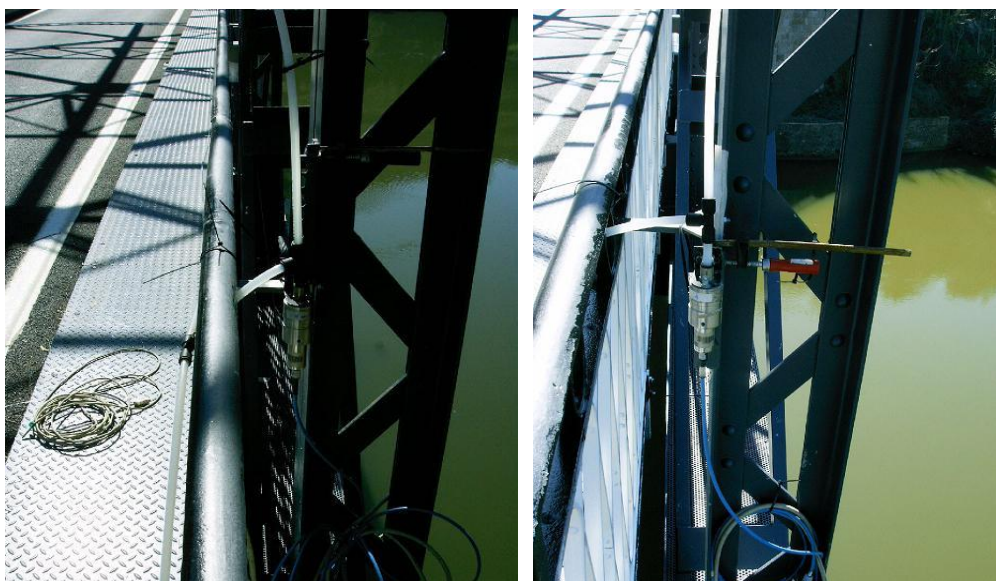


Fig. 4.47 - Ilustração dos sensores de pressão DVT3J e DVT1M.

Sensores de deslocamento DVT2M e DVT3M



Fig. 4.48 - Ilustração dos sensores de pressão DVT2M.

4.4.3.3 COMPARADOR ELÉCTRICO

Na Ponte do Pinhão foram medidos deslocamentos verticais também com recurso a um comparador eléctrico. Foi instalado um comparador eléctrico na primeira fase do ensaio de carga. O ponto de medição de deslocamentos verticais foi a meio do primeiro tramo do lado montante, no mesmo ponto em que se colocou também um sensor de pressão designado por DVT3M, permitindo comparar deslocamentos entre sistemas diferentes. Na Figura 4.46 e Figura 4.47 apresenta-se respectivamente a localização e a ilustração do comparador eléctrico instalado.

4.4.3.4 LOCALIZAÇÃO E ILUSTRAÇÃO DO COMPARADOR ELÉCTRICO

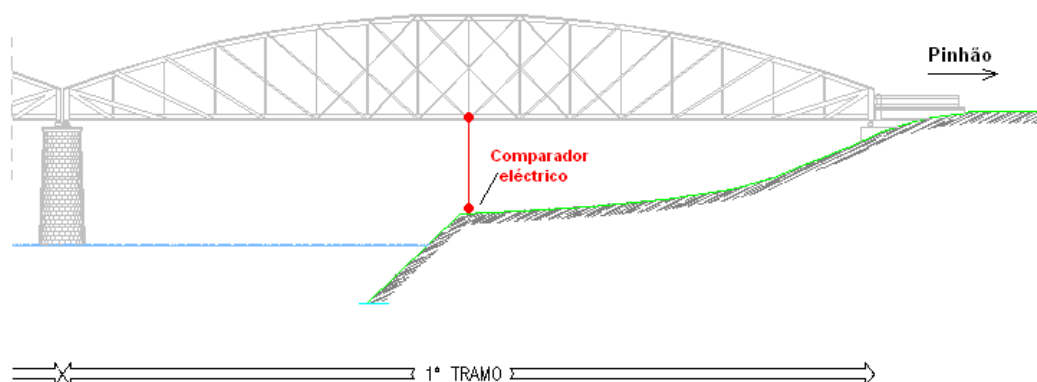


Fig. 4.46- Localização do comparador eléctrico instalado.



Fig. 4.47 - Ilustração do comparador eléctrico usado na primeira fase do ensaio de carga.

4.4.3.5 LVDT

Na Ponte do Pinhão foram medidos deslocamentos verticais também com recurso a um LVDT. Foi instalado um LVDT para medir flechas, na segunda fase do ensaio de carga. O ponto de medição de deslocamentos verticais foi a meio do primeiro tramo do lado Jusante. Na figura 4.48 e figura 4.49 apresenta-se respectivamente a localização e a ilustração do transdutor de deslocamento instalado.

4.4.3.6 LOCALIZAÇÃO E ILUSTRAÇÃO DO COMPARADOR ELÉCTRICO

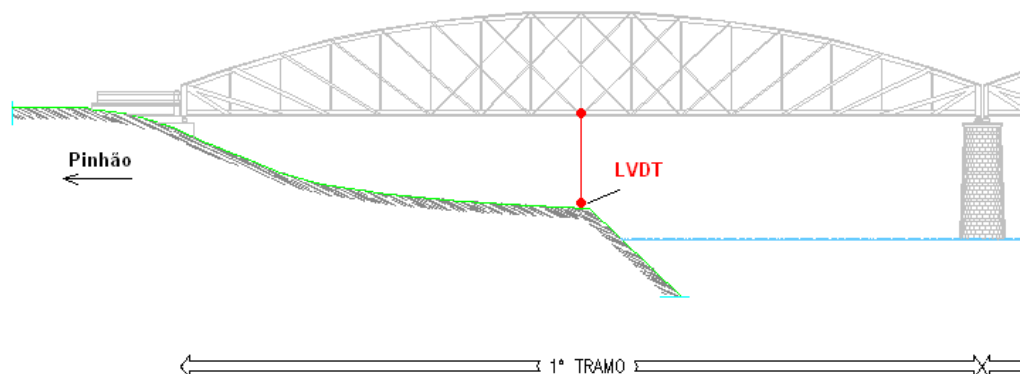


Fig. 4.49 - Localizações do LVDT para a medição da flecha a meio vão.



Fig. 4.50 - Ilustração do LVDT usado na segunda fase do ensaio de carga.

4.4.4 MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS

Em ambas as fases do ensaio de carga foram utilizados LVDT'S que permitiram medir deslocamentos horizontais dos apoios. Na primeira fase do ensaio de carga foram colocados somente nos apoios móveis do primeiro tramo (pilar P1) enquanto que na segunda fase do ensaio de carga foram colocados sobre todos os apoios móveis de todos os tramos (pilar P1, P2 e P3), fazendo estes últimos parte do equipamentos de monitorização permanente.

4.4.4.1 LOCALIZAÇÃO E ILUSTRAÇÃO DOS LVDT'S NA PRIMEIRA FASE DO ENSAIO DE CARGA

Foram utilizados transdutores indutivos de deslocamento para medir a abertura da junta de dilatação da ponte, localizados nos apoios móveis do primeiro tramo, medindo deslocamentos longitudinais.

No total foram instalados dois LVDT's, nos apoios móveis do primeiro tramo, ou seja, apoios que se encontram sobre o pilar P1. Na figura 4.51 e figura 4.52 apresenta-se a localização e a ilustração dos dois LVDT's.

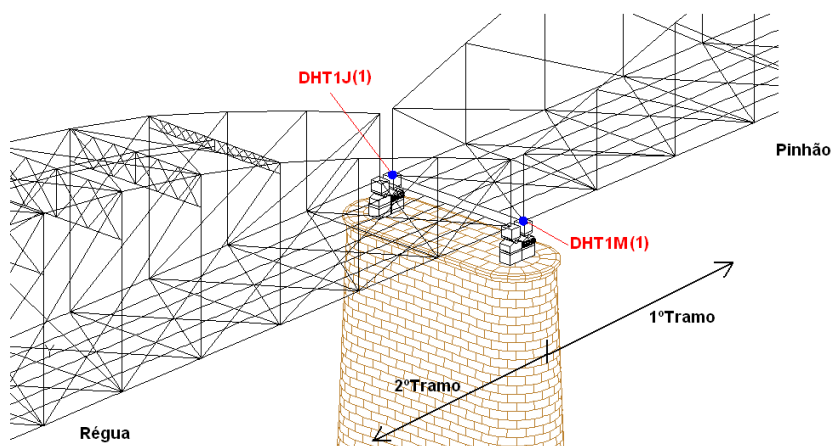


Fig. 4.51 - Localização dos LVDT's instalados no pilar P1.

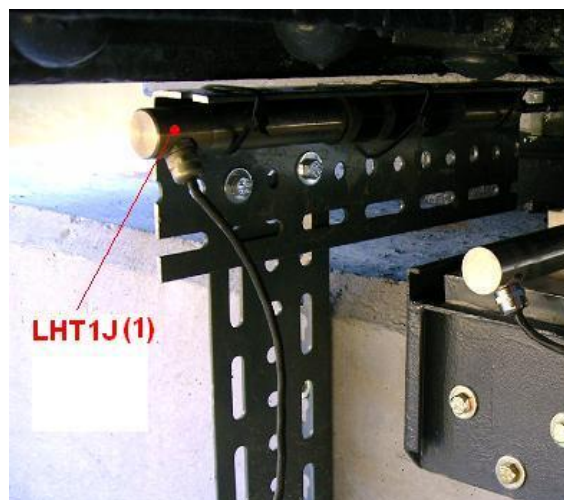


Fig. 4.52 - Ilustração do LVDT instalados a montante e a jusante.

4.4.4.2 LOCALIZAÇÃO E ILUSTRAÇÃO DOS LVDT'S NA SEGUNDA FASE DO ENSAIO DE CARGA

Também foram utilizados transdutores indutivos de deslocamento para medir abertura das juntas de dilatação da ponte, localizados nos apoios móveis dos três tramos. No total foram instalados seis LVDT's, nos apoios móveis de todos os tramos, ou seja, apoios que se encontram sobre o pilar P1, P2 e P3. Da figura 4.53 à figura 4.58 apresenta-se a localização e a ilustração dos diversos LVDT's.

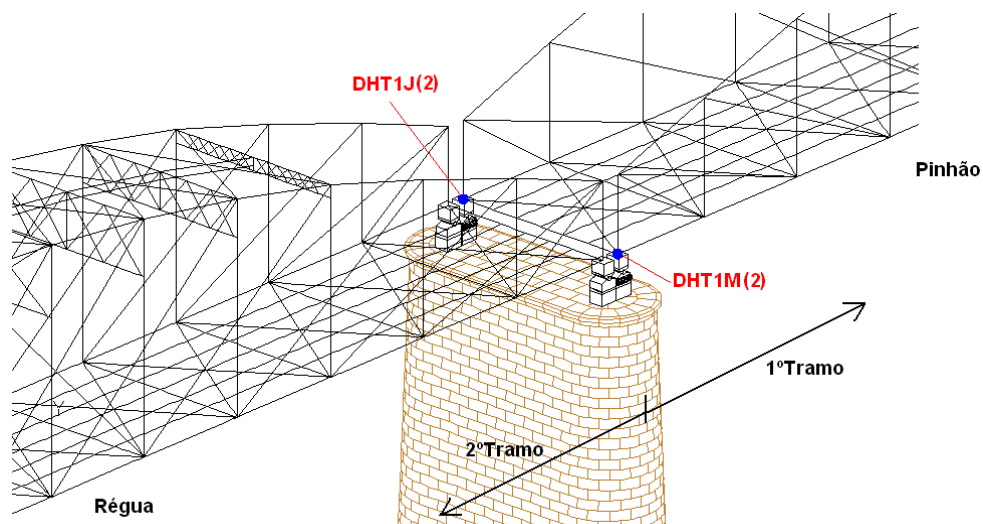


Fig 4.53 – localização dos LVDT's instalados no pilar P1.

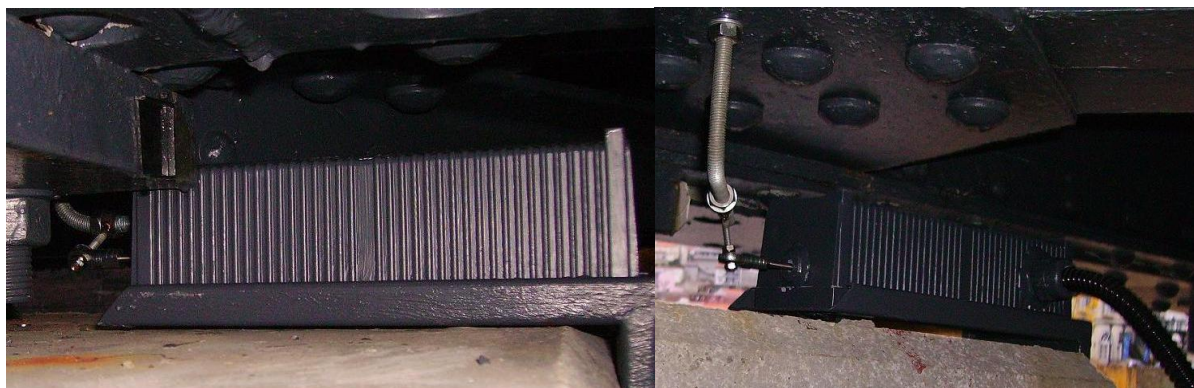


Fig. 4.54 - Ilustração dos LVDT's no pilar P1 respectivamente montante e jusante.

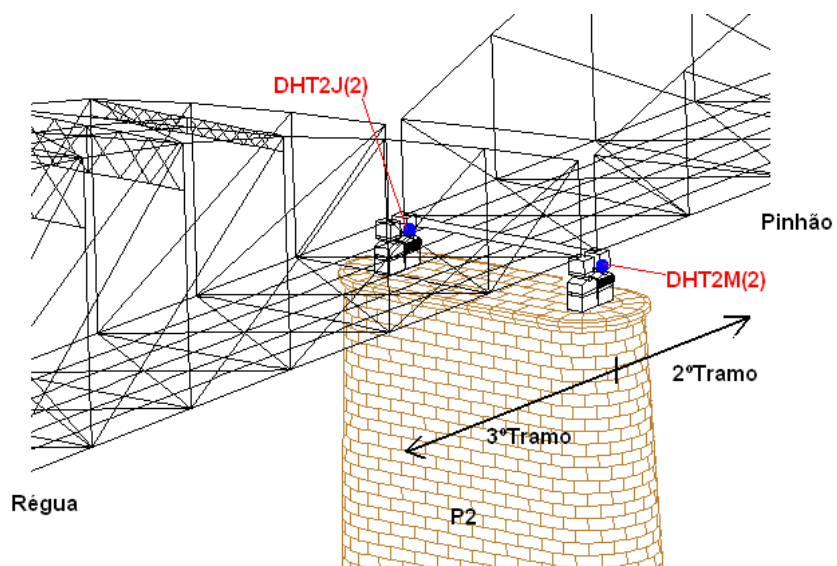


Fig 4.55 – localização dos LVDT's instalados no pilar P2.



Fig. 4.56 - Ilustração dos LVDT's no pilar P2 respectivamente montante e jusante.

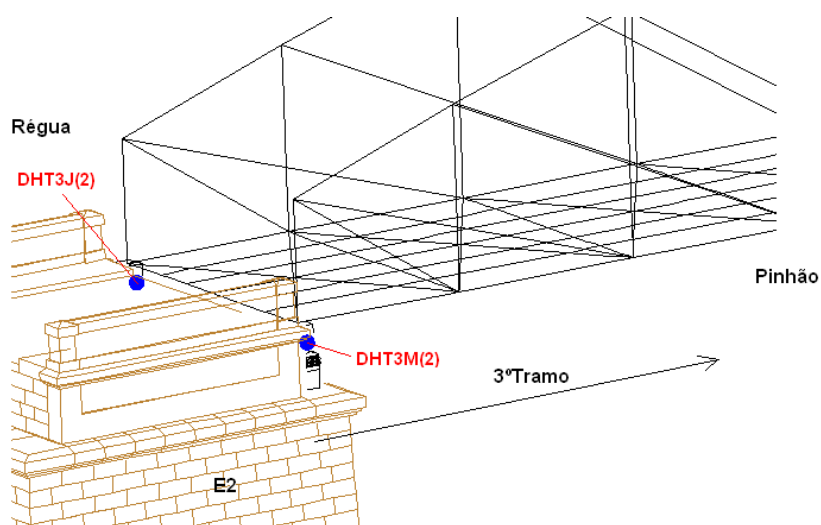


Fig. 4.57 - Localização dos LVDT's instalados no pilar P3.

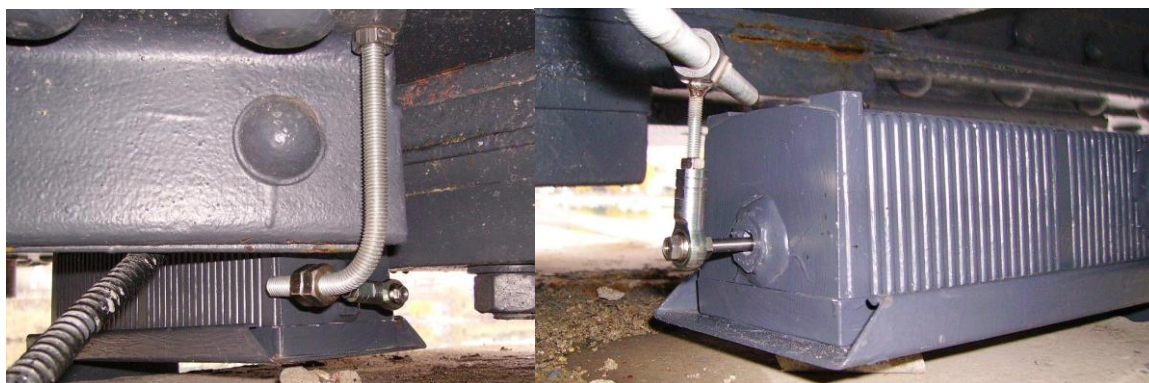


Fig. 4.58 - Ilustração dos LVDT's no pilar P3, respectivamente montante e jusante.

4.4.5 MEDIÇÃO DE INCLINAÇÕES

4.4.5.1 LOCALIZAÇÃO DO INCLINÓMETRO NA PRIMEIRA FASE DO ENSAIO DE CARGA

Foi utilizado um inclinómetro biaxial para medir inclinações em duas direcções, localizado no apoio fixo do primeiro tramo, encontro E1. Na Figura seguinte apresenta-se a localização do inclinómetro biaxial.

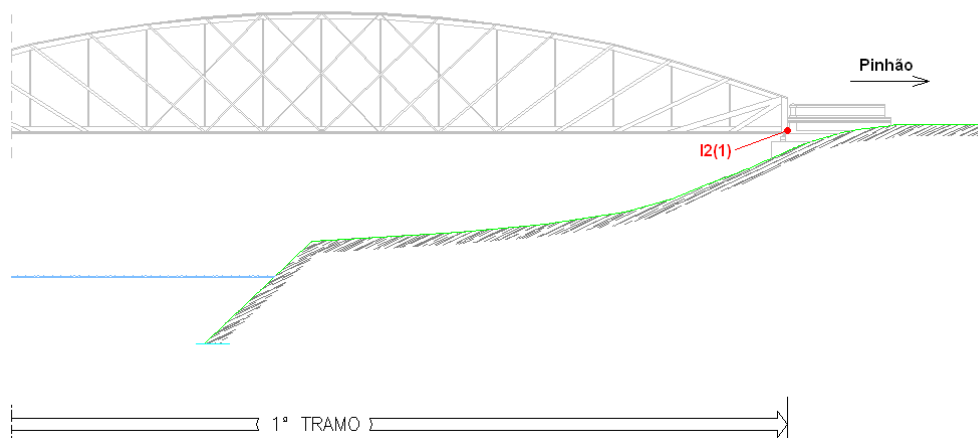


Fig 4.59 – Localização do inclinómetro instalado.

4.4.5.2 LOCALIZAÇÃO DOS INCLINÓMETROS NA SEGUNDA FASE DO ENSAIO DE CARGA

Na segunda fase do ensaio de carga foram utilizados dois inclinómetros, fazendo parte do equipamento permanente, localizando-se no apoio fixo do primeiro tramo (E1) e a meio vão do primeiro tramo. O objectivo do inclinómetro instalado no encontro E1 é a obtenção de rotações no sentido longitudinal da própria estrutura, já o inclinómetro instalado a meio vão do 1ºtramo é a obtenção de rotações transversais. Nas Figuras seguintes apresenta-se a localização e ilustração dos inclinómetros.

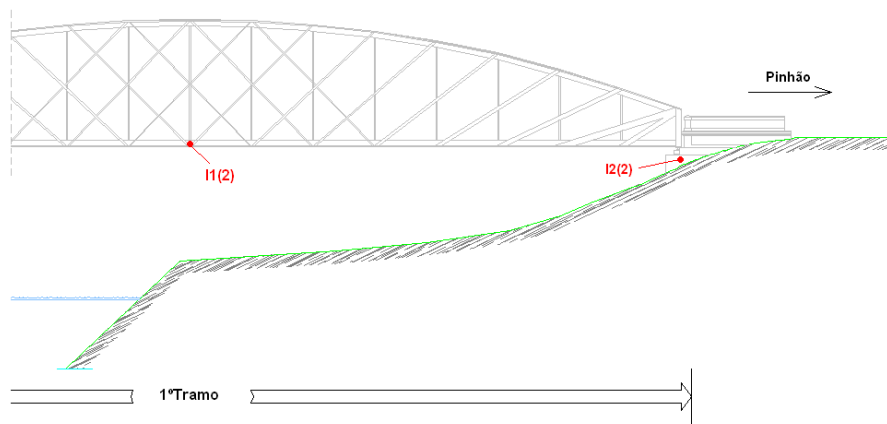


Fig 4.60 – Localização dos inclinómetros instalados na segunda fase do ensaio de carga.



Fig. 4.61 - Ilustrações do inclinómetro a meio vão.



Fig. 4.62 - Ilustração do inclinómetro no encontro E1.

4.4.6 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

4.4.6.1 LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

Na Ponte do Pinhão foram medidas a temperatura ambiente e a da própria estrutura com recurso a sensores de temperatura somente na segunda fase do ensaio de carga, esses mesmos sensores fazem parte da instrumentação permanente. Os sensores de temperatura que se encontram juntos aos extensómetros ou colados à própria estrutura têm como principal objectivo registar a temperatura da estrutura, enquanto que os que se encontram suspensos têm como finalidade registar a temperatura ambiente. No total foram instalados oito sensores de temperatura; os pontos de medição da temperatura encontram-se todos a meio vão.

Da figura 4.63 à figura 4.80 apresentam-se respectivamente a localização e a ilustração dos sensores de temperatura instalados.

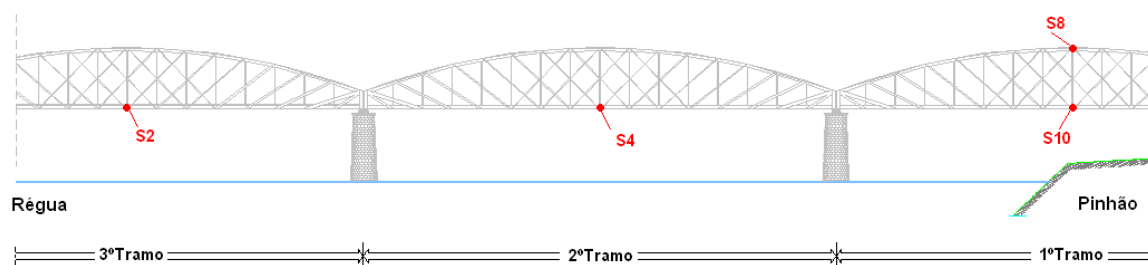


Fig 4.63 – Localização dos termómetros instalados a montante.

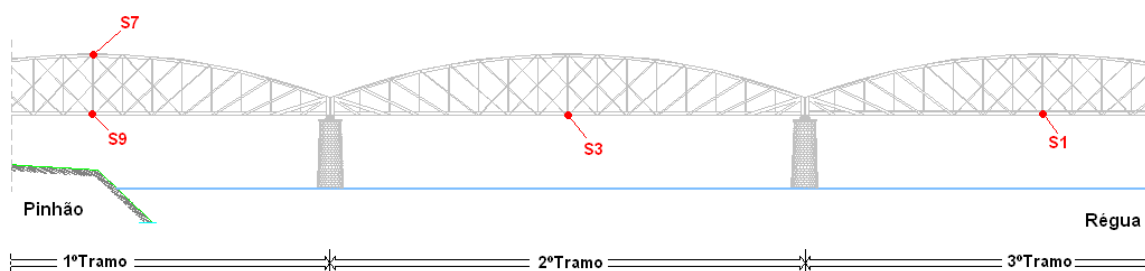


Fig 4.64 – Localização dos termómetros instalado a jusante.

Sensor de temperatura na secção S1

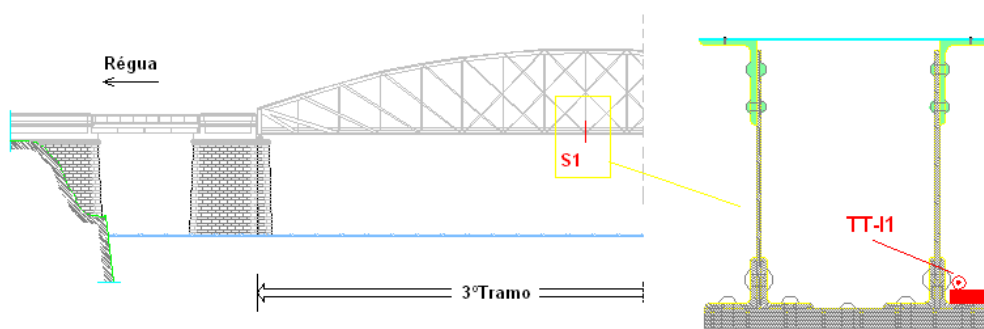


Fig 4.65 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S1.

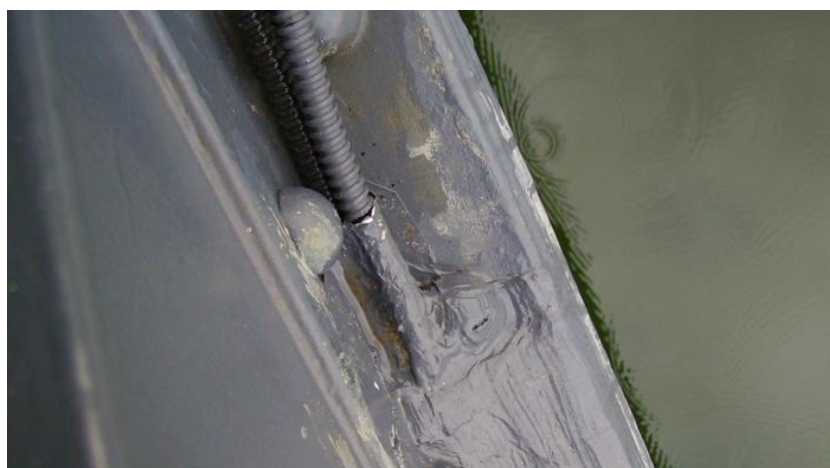


Fig. 4.66 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S1.

Sensor de temperatura na secção S2

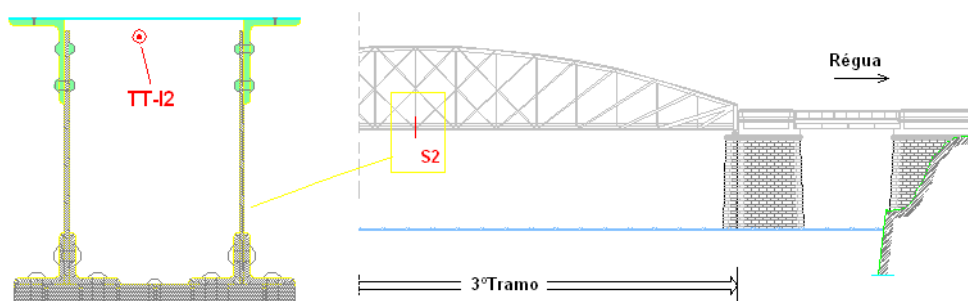


Fig. 4.67 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S2.



Fig. 4.68 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S2.

Sensor de temperatura na secção S3

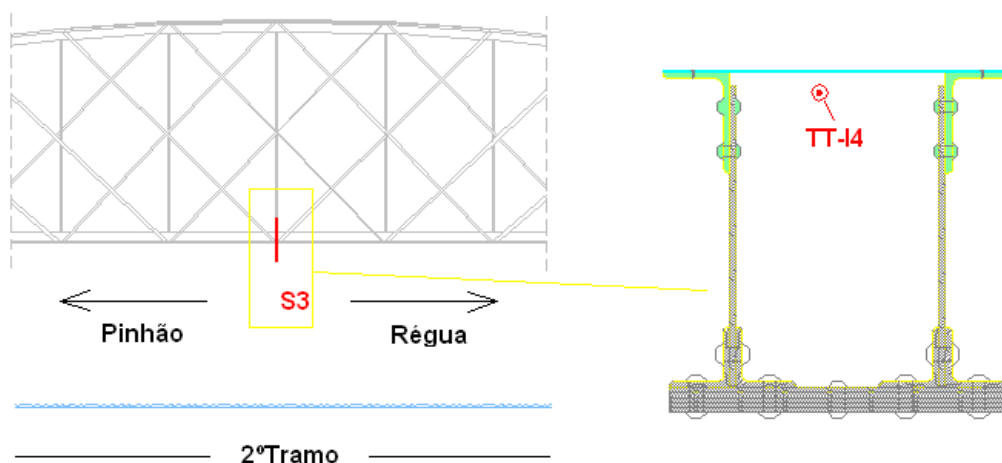


Fig 4.69 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S3.



Fig. 4.70 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S3.

Sensor de temperatura na secção S4

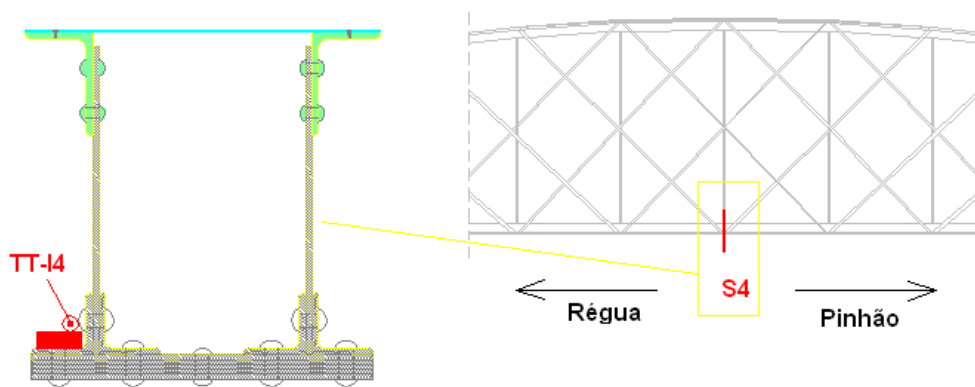


Fig. 4.71 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S4.



Fig. 4.72 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S4.

Sensor de temperatura na secção S7

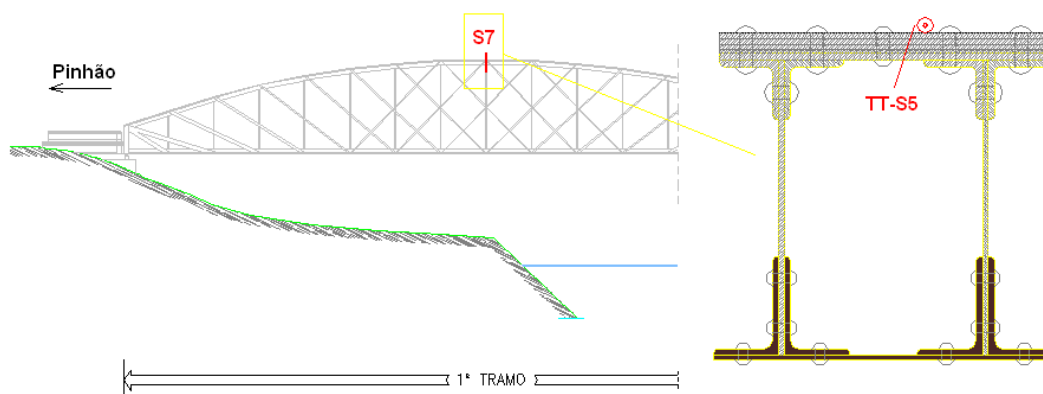


Fig. 4.73 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S7.

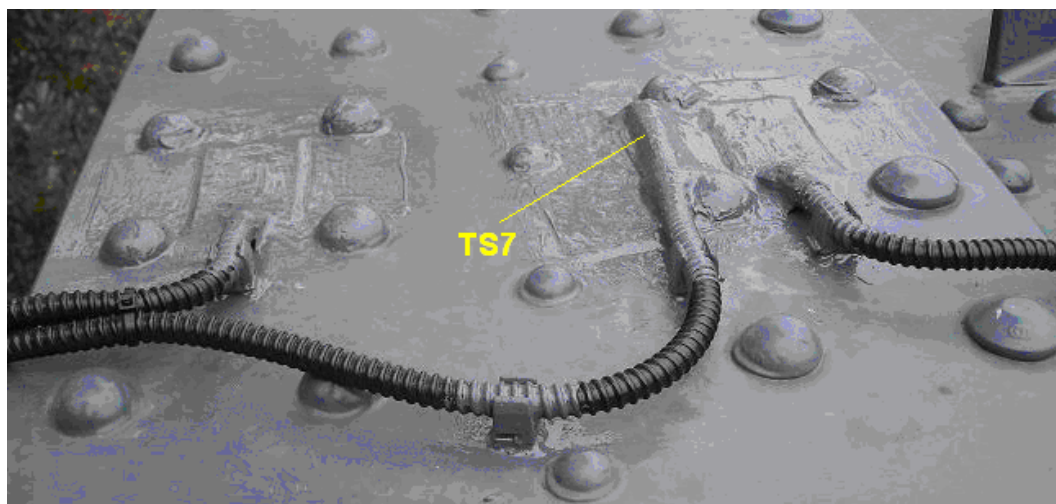


Fig. 4.74 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S7.

Sensor de temperatura na secção S8

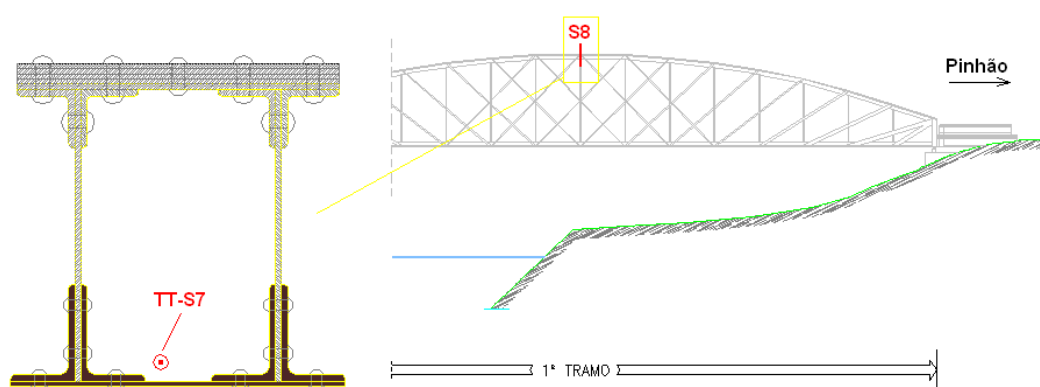


Fig 4.75— Localização do sensor de temperatura instalado na secção S8.



Fig. 4.76 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S8.

Sensor de temperatura na secção S9

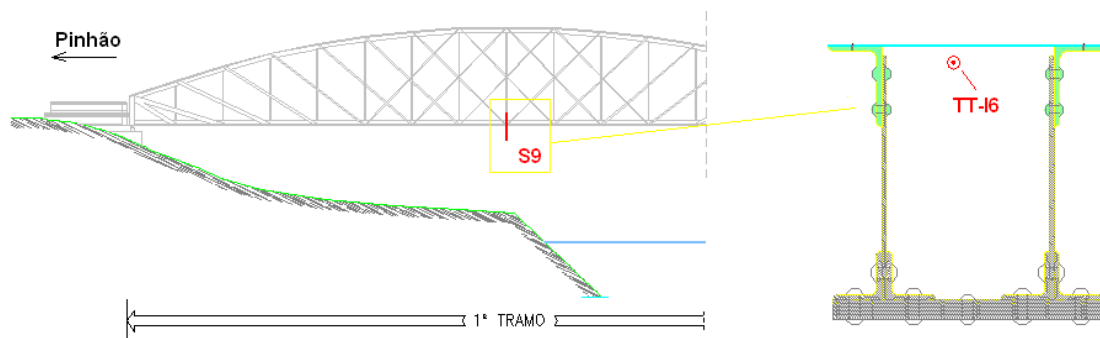


Fig 4.77 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S9.



Fig. 4.78 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S9.

Sensor de temperatura na secção S10

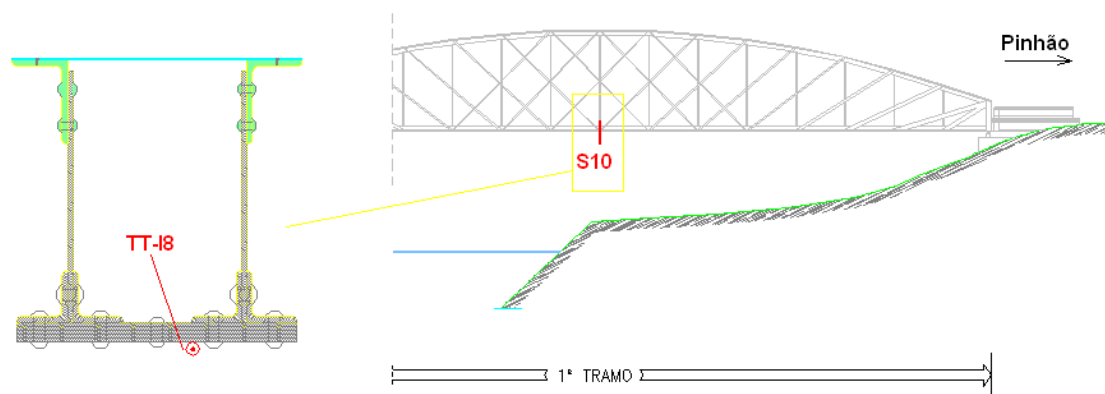


Fig. 4.79 — Localização do sensor de temperatura instalado na secção S10.

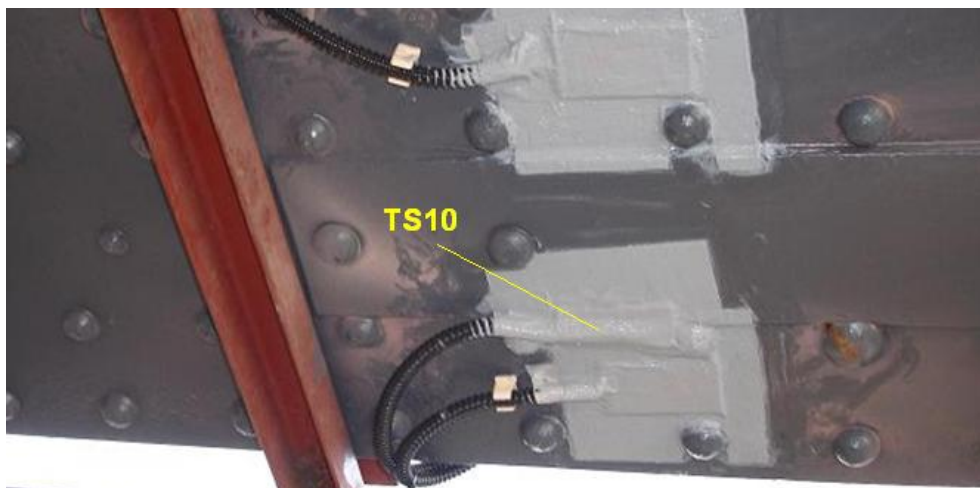


Fig. 4.80 — Ilustração do sensor de temperatura na secção S10.

4.4.7 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

O sistema de aquisição e de armazenamento de sinal proveniente dos sensores foi concentrado em três postos de observação (PO1, PO2 e PO3), com a distribuição assinalada na figura 4.81. O PO1 foi localizado sobre o pilar P2, o PO2 sobre o encontro do lado do Pinhão E1 e o posto PO3 a meio vão do 2º tramo. O posto PO3 trata-se de um posto provisório utilizado apenas na primeira fase do ensaio de carga, nesse mesmo posto de observação foram ligados os sensores de pressão, inclinómetro, comparador eléctrico e LVDT's.

Os restantes postos PO1 e PO2 correspondem a postos definitivos utilizados na segunda fase do ensaio de carga, nos quais se ligou todos os sensores utilizados na segunda fase do ensaio de carga, tais como extensómetros, sensores de temperatura e inclinómetros.

O equipamento utilizado na primeira fase ensaio de carga assenta na solução dataTaker®, constituída por módulos programáveis de aquisição e de armazenamento de dados, com funcionamento autónomo, permitindo leituras à frequência máxima de 1Hz. Já na segunda fase do ensaio de carga foi utilizado um equipamento diferente do que o tradicional dataTaker®, o equipamento utilizado consiste no CompactRIO. O CompactRIO da *National Instruments* pode efectuar leituras de 100Hz, permitindo assim efectuar-se análises dinâmicas. O objectivo na segunda fase do ensaio de carga, para além do estudo da resposta dos diferentes sensores para as cargas estáticas, foi também o de estudar o amortecimento da própria estrutura.

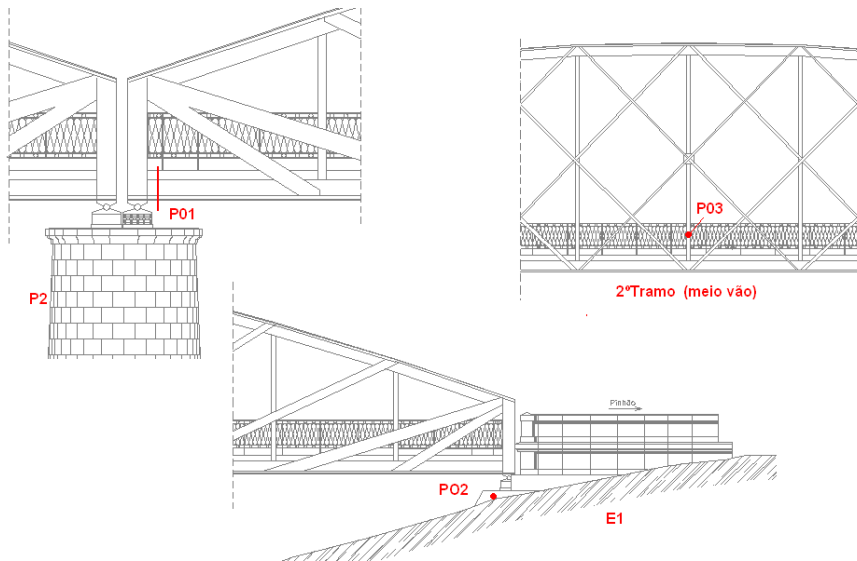


Fig. 4.81 — Localização dos sistemas de aquisição.

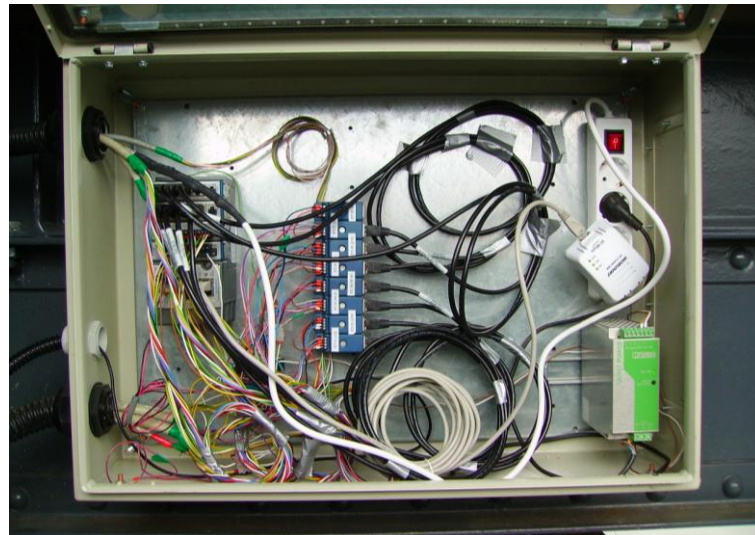


Fig. 4.82 — Ilustração do sistema de aquisição P01.



Fig. 4.83 — Ilustração do sistema de aquisição P02.



Fig. 4.84 — Ilustração do sistema de aquisição P03.

4.5 ENSAIO DE CARGA

Nesta secção descrevem-se as principais características dos veículos utilizados para a realização das sobrecargas, o seu posicionamento em perfil, sequência adoptada, os objectivos a atingir com os casos de carga definidos, para as diferentes fases do ensaio de carga. A primeira fase do ensaio de carga na Ponte do Pinhão decorreu no dia 9 de Março de 2007, a segunda fase do ensaio de carga na qual participou o autor desta dissertação decorreu no dia 21 de Janeiro de 2008. Para a primeira fase do ensaio de carga foram utilizados sete veículos e para a segunda fase do ensaio de carga foram utilizados 3 veículos, dispostos nas condições consideradas mais desfavoráveis para as grandezas que foram medidas.

4.5.1 PRIMEIRA FASE DO ENSAIO DE CARGA

4.5.1.1 VEÍCULOS UTILIZADOS

Na primeira fase do ensaio de carga da ponte foram utilizados sete veículos, identificados no Quadro seguinte, cujas características constam a figura e quadros seguintes. Os veículos possuíam apenas seu peso bruto, sem qualquer carga adicional.

Quadro 4.1 – Designação dos veículos.

Designação	Matrícula
A	32-88-ZJ
B	13-AS-68
C	75-71-QX
D	91-88-RW
E	96-AS-50
F	96-AS-51
G	NF-20_85

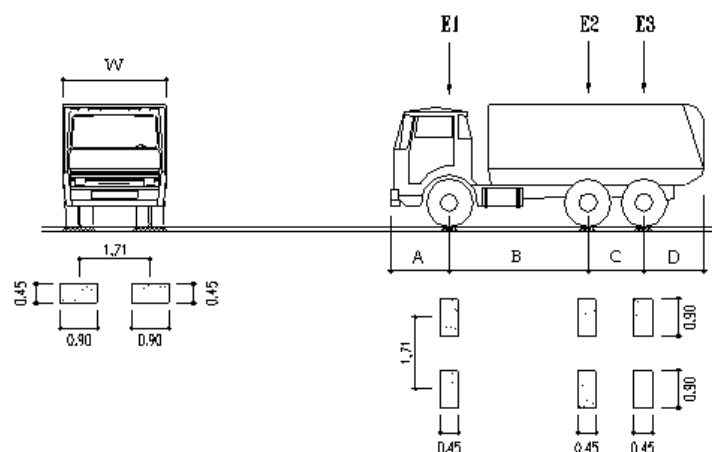


Fig. 4.84 – Características do veículo tipo proposto para o ensaio.

Quadro 4.2 – Características geométricas e peso dos veículos utilizados no ensaio de carga.

Veículo	Dimensões					Peso
	A	B	C	D	W	Tara (t)
A	1,40	3,15	1,40	1,40	2,50	11,33
B	1,40	3,10	1,40	1,40	2,50	11,25
C	1,30	3,90	1,40	1,50	2,50	13,50
D	1,30	3,85	1,40	1,50	2,50	13,16
E	1,30	3,85	1,40	1,50	2,50	13,98
F	1,30	3,85	1,40	1,50	2,50	13,98
G	1,30	4,20	1,40	1,90	2,50	13,05

Quadro 4.3 – Peso por eixo dos veículos utilizados no ensaio de carga.

Veículo	Peso por eixo [kg]		
	E1	E2	E3
A	5665	2832,5	2832,5
B	5625	2812,5	2812,5
C	6750	3375	3375
D	6580	3290	3290
E	6990	3495	3495
F	6990	3495	3495
G	6525	3262,5	3262,5

4.5.1.2 CASOS DE CARGA

Foram definidos 3 casos de carga, repetindo-se ao longo de 2 percursos designados por R-P e P-R neste documento. O percurso R-P corresponde ao sentido RÉGUA-PINHÃO e percurso P-R corresponde ao sentido PINHÃO-RÉGUA.

Os casos de carga propostos induzem os valores mais elevados das grandezas a medir nas secções instrumentadas. Para as posições de carga estáticas foram utilizados 7 veículos sobre o tabuleiro.

Nas figuras seguintes são apresentadas as posições longitudinais ocupadas por cada grupo de veículos sobre o tabuleiro durante a condução do ensaio de carga. A figura 4.88 representa a posição dos veículos na secção transversal do tabuleiro e da figura 4.85 a figura 4.91 ilustram-se sequências de cargas do ensaio. Para garantir que a posição dos veículos imobilizados correspondia efectivamente à desejada, foram efectuadas marcas no pavimento.

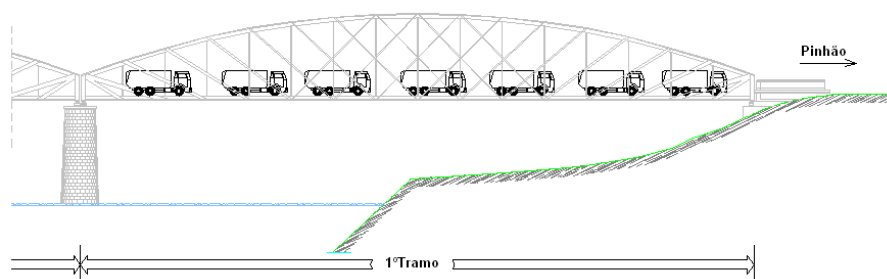


Fig. 4.85 – Caso de carga 1.

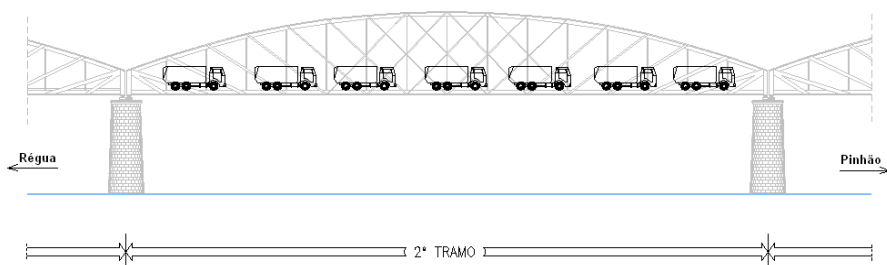


Fig. 4.86 – Caso de carga 2.

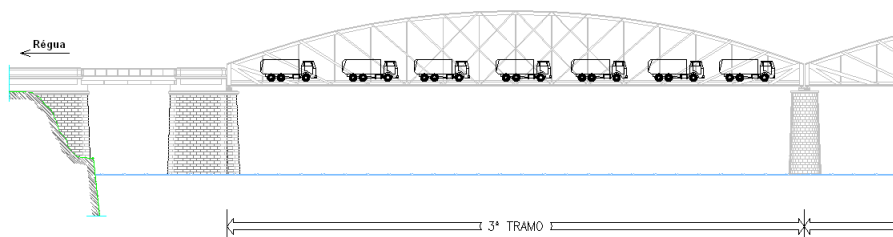


Fig. 4.87 – Caso de carga3.

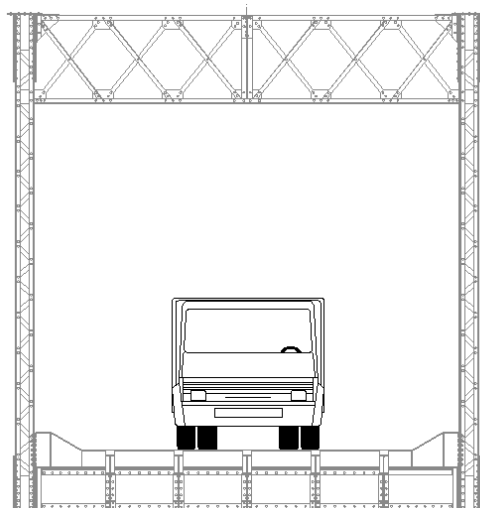


Fig. 4.88– Posição dos veículos na secção transversal do tabuleiro.



Fig. 4.89 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 1.

Figura 4.90 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 2.





Figura 4.91 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 3.

O quadro 4.4 -Resume os principais resultados que se pretende obter para cada uma das posições.

Caso de Carga	Descrição da acção	Resultado pretendido	Sensores interessados
1R-P; 1P-R	Conjunto de 7 veículos posicionados no 1º tramo da ponte, separados por uma distância de 1,94 metros.	Máximo deslocamento vertical no 1º tramo	DVT3M, DVT3J, DHT1M, DHT1J e Comparador
2R-P; 2P-R	Conjunto de 7 veículos posicionados no 2º tramo da ponte, separados por uma distância de 1,94 metros.	Máximo deslocamento vertical no 2º tramo	DVT2M, DVT2J
3R-P; 3P-R	Conjunto de 7 veículos posicionados no 3º tramo da ponte, separados por uma distância de 1,94 metros.	Máximo deslocamento vertical no 3º tramo	DVT1M, DVT1J

4.5.1.3 CONDUÇÃO DO ENSAIO

Foram definidos dois períodos de observação, associando-se a cada um deles uma sequência de posições de veículos. No primeiro período de observação incluem-se os casos de carga correspondentes ao percurso R-P (Régua - Pinhão), e o segundo período de observação engloba os casos de carga correspondentes ao percurso P-R (Pinhão - Régua).

A medição do zero de referência de todos os sensores com o tabuleiro sem qualquer veículo, situação de vazio, foi feita no início do ensaio e no intervalo entre os períodos referidos e no final do ensaio.

Durante todo o ensaio de carga o sistema de aquisição automático procedeu à aquisição do sinal em contínuo, com intervalo entre aquisições de 1 segundo. Registou-se a hora de início e de fim de cada uma das fases relevantes do ensaio, nomeadamente a situação de vazio e imobilização dos veículos

sobre o tabuleiro nas posições definidas. O quadro seguinte resume a sequência das situações observadas durante o ensaio de carga com a indicação da hora de início e de fim de cada uma delas. Esta informação é útil para a interpretação dos gráficos que contém a evolução das medições efectuadas neste período. O ensaio de carga teve início às 10:52:46 horas e terminou às 13:44:16 horas.

Quadro 4.5 – Sequência do ensaio de carga.

Sentido	Descrição das fases de observação	Hora inicial	Hora final
	Vazio	12:45:35	12:46:07
R-P	Posição 3	12:51:00	12:53:00
	Posição 2	13:00:00	13:02:00
	Posição 1	13:06:54	13:08:54
	Vazio	13:15:53	13:16:49
P-R	Posição 3	13:20:20	13:21:20
	Posição 2	13:24:45	13:25:45
	Posição 1	13:30:00	13:31:00
	Vazio	13:35:00	13:37:00

O registo das medições para situação de vazio (estrutura descarregada), nas duas fases do ensaio (início de cada percurso e no final), permitiu observar o efeito da variação da temperatura sobre a estrutura e sobre o próprio sistema de medição. Esta informação é útil no tratamento dos valores da medição associados a cada posição dos veículos (imobilizados) sobre a ponte. Nomeadamente foi possível estabelecer a evolução dos zeros de referência ao longo do período de observação.

4.5.1.4 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Apresentam-se nesta secção os resultados da medição efectuada em obra durante a condução do ensaio de carga. Conforme exposto anteriormente, para o ensaio de carga estático foram definidas 3 posições dos veículos estacionados sobre a ponte repetindo-se ao longo dos dois percursos. Além das situações de carregamento registou-se ainda o sinal dos sensores em três situações de vazio, no início do ensaio, no final e durante um período intermédio. A medição foi feita em contínuo, desde o início até ao fim do ensaio, com intervalo entre medições de 1 segundo.

A ordem por que são apresentados os casos de carga está de acordo com a sequência adoptada para as posições dos veículos no decorrer do ensaio de carga. Os resultados que a seguir se apresentam traduzem a variação de cada uma das grandezas medidas em relação à primeira leitura efectuada.

Nos gráficos são apresentados, no interior de círculos, o número das posições que os veículos ocuparam em cada momento. Na secção seguinte procede-se a um tratamento desta informação, com especial relevo para a correcção dos valores de referência (zero dos sensores a atribuir a cada fase) com vista à obtenção do valor de medição de cada sensor para cada caso de carga. São apresentados, no Anexo A, quadros que resumem a medição relativa aos diferentes percursos. Para cada uma das fases deste percurso, são apresentados os resultados de um estudo estatístico que inclui grandezas como a média, os valores máximos e mínimos da medição, o desvio padrão e o número de leituras (amostras) efectuadas durante cada fase do ensaio.

De seguida serão representados os resultados das flechas a meio-vão de cada tramo que se obteve com os sensores de pressão e com o comparador eléctrico e também as rotações obtidas com o inclinómetro, para ambos os percursos (Régua - Pinhão e Pinhão - Régua).

Flechas a meio-vão de cada tramo da ponte obtidas por meio de níveis líquidos no percurso R-P.

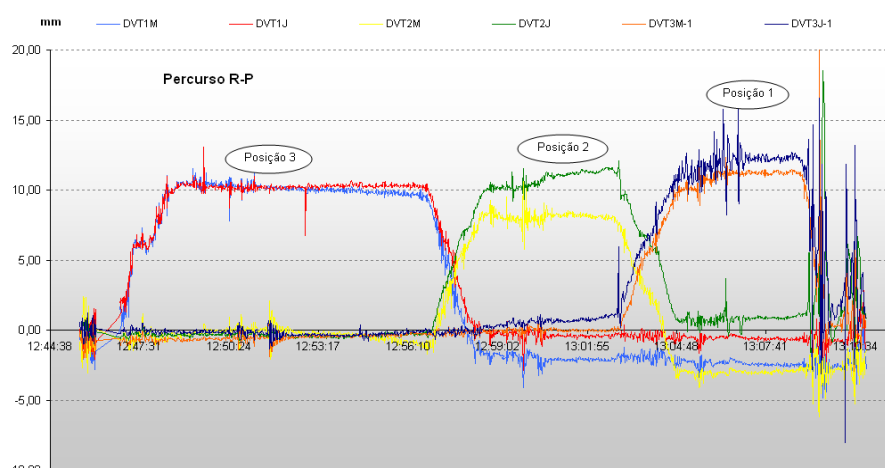


Fig. 4.92 – Flechas a meio-vão de cada tramo da ponte medidas com sensores de pressão.

Flecha a meio-vão no 3º tramo do lado de montante, no percurso R-P: DVT1M

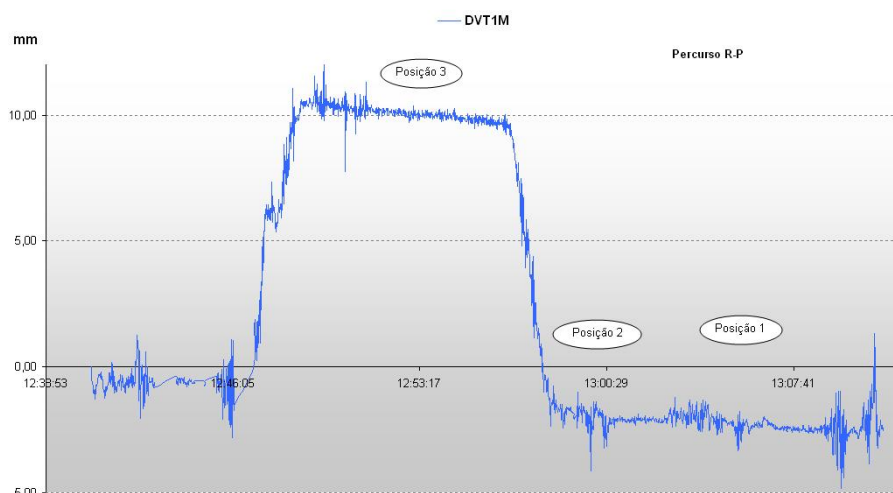


Fig. 4.93 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 3º Tramo medidos do lado de montante.

Flecha a meio-vão no 3ºtramo do lado de jusante, no percurso R-P: DVT1J

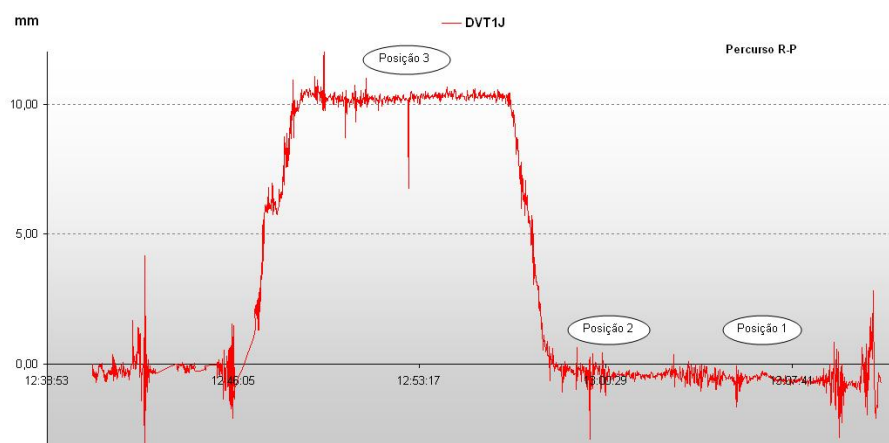


Fig. 4.94 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 3º Tramo medidos do lado de jusante.

Flecha a meio-vão no 2ºtramo do lado de montante, no percurso R-P: DVT2M



Fig. 4.95 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 2º Tramo medidos do lado de montante.

Flecha a meio-vão no 2ºtramo do lado de jusante, no percurso R-P: DVT2J

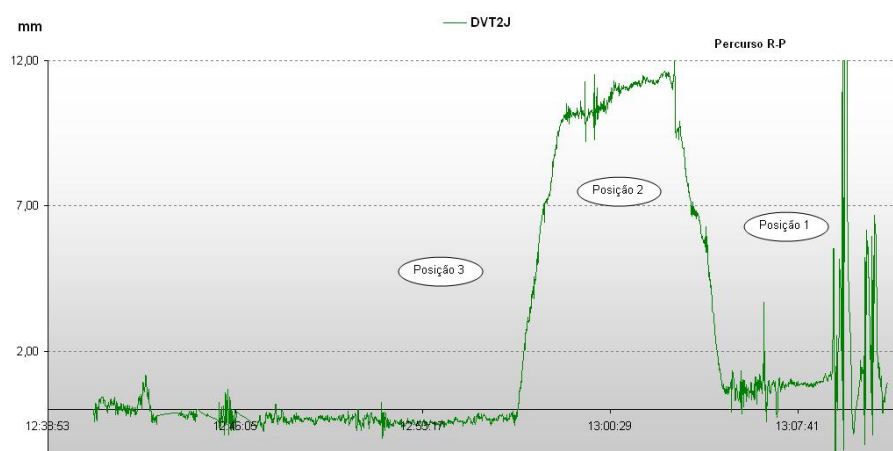


Fig. 4.96 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 2º Tramo medidos do lado de jusante.

Flecha a meio-vão no 1º tramo do lado de montante, no percurso R-P: DVT3M

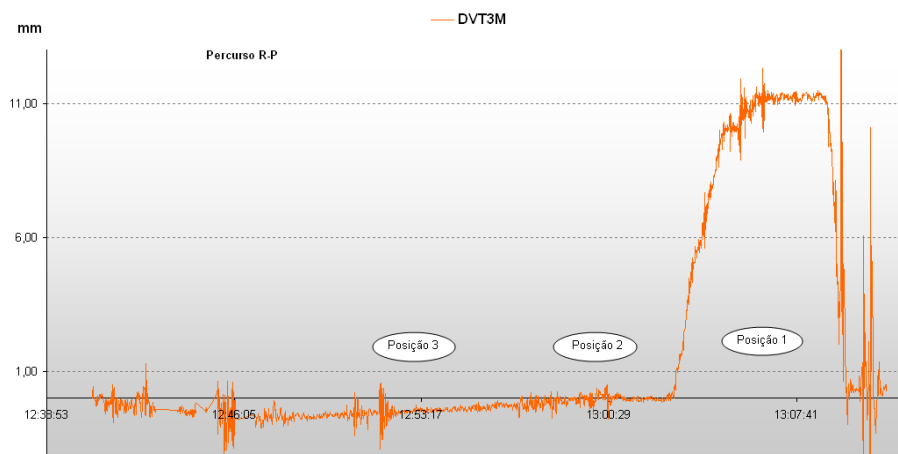


Fig. 4.97 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de montante.

Flecha a meio-vão no 1º tramo do lado de jusante, no percurso R-P: DVT3J

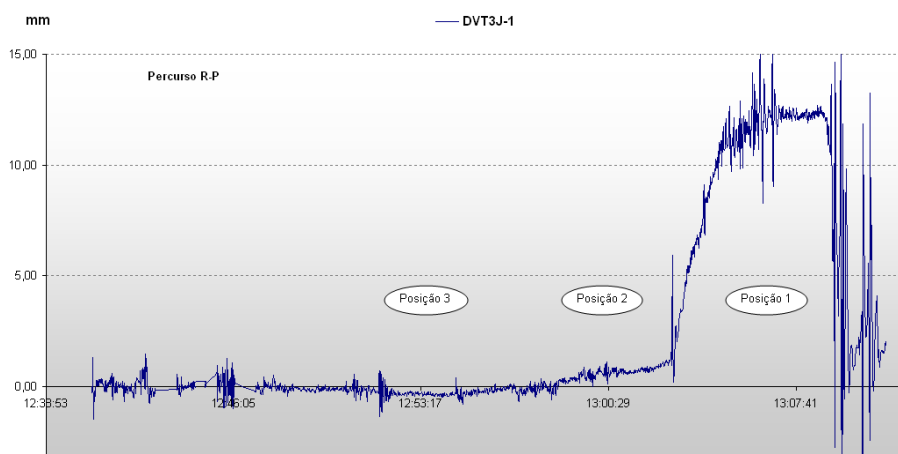


Fig. 4.98 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de jusante.

Flechas a meio-vão do 1º tramo da ponte obtidas por meio de um comparador eléctrico no percurso R-P.

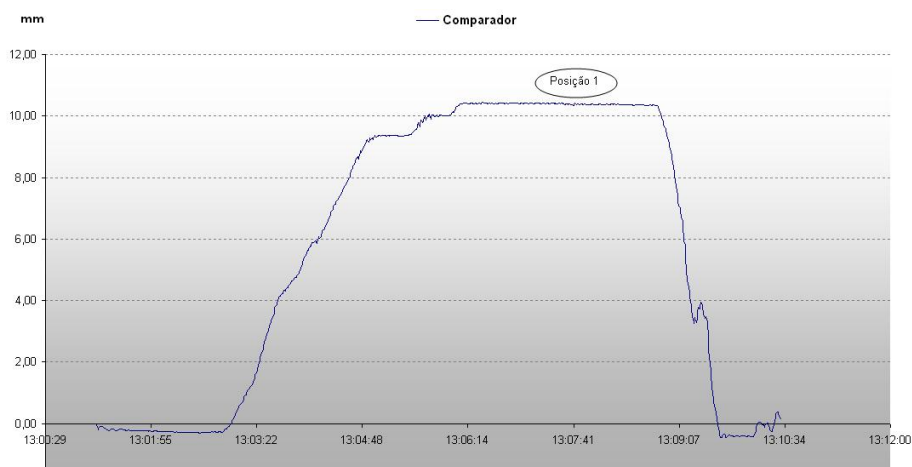


Fig. 4.99 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de montante.

Abertura da junta de dilatação no 1º tramo no pilar P1, percurso R-P: DHT1M.

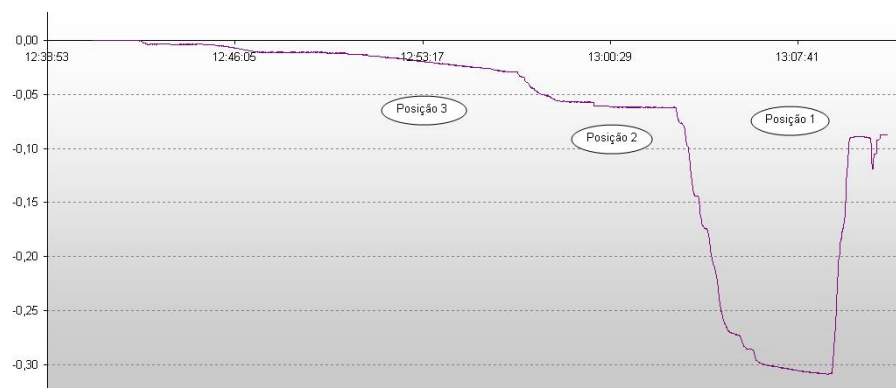


Fig. 4.100 – Abertura da junta de dilatação localizada no 1º tramo sobre o pilar P1.

Abertura da junta de dilatação no 1º tramo no pilar P1, percurso R-P: DHT1J.



Fig. 4.101 – Abertura da junta de dilatação localizada no 1º tramo sobre o pilar P1

De seguida apresenta-se os resultados obtidos pelos sensores de pressão e comparador eléctrico, LVDT's e inclinómetros, no sentido Pinhão – Régua.

Flechas a meio-vão de cada tramo da ponte obtidas por meio de níveis líquidos no percurso P-R.

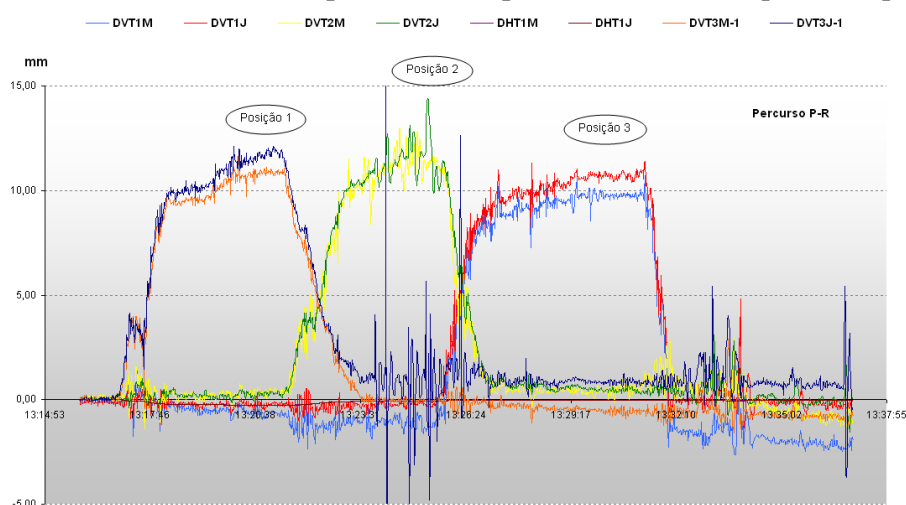


Fig. 4.102 – Flechas a meio-vão de cada tramo da ponte medidas com sensores de pressão.

Flecha a meio-vão no 3º tramo do lado de montante, no percurso P-R: DVT1M

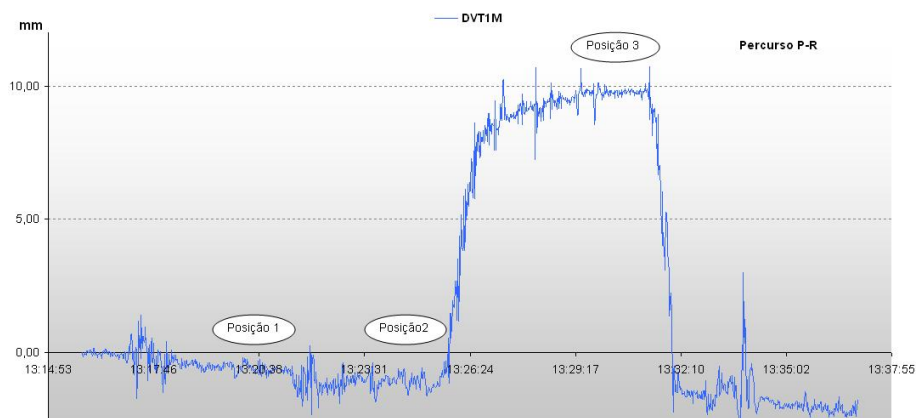


Fig. 4.103 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 3º Tramo medidos do lado de montante.

Flecha a meio-vão no 3º tramo do lado de jusante, no percurso P-R: DVT1J

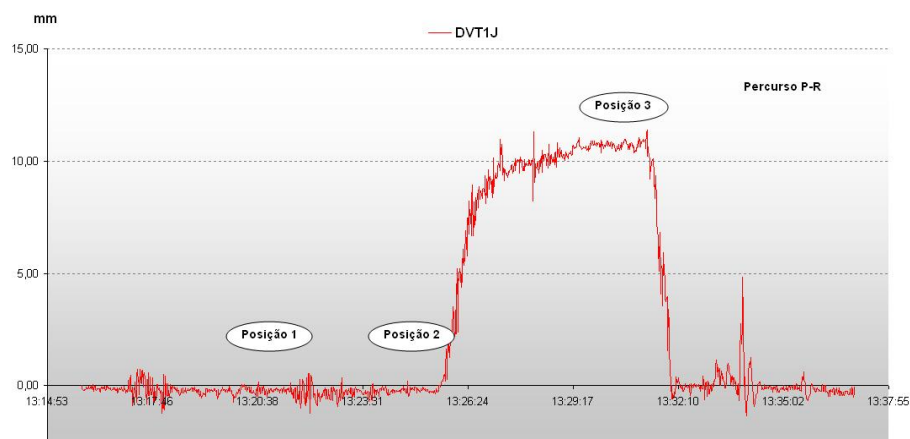


Fig. 4.104 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 3º Tramo medidos do lado de jusante.

Flecha a meio-vão no 2º tramo do lado de montante, no percurso P-R: DVT2M

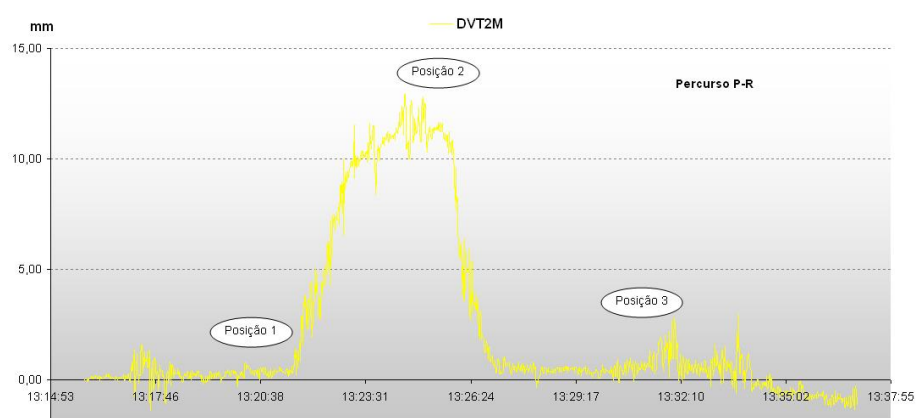


Fig. 4.105 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 2º Tramo medidos do lado de montante.

Flecha a meio-vão no 2º tramo do lado de jusante, no percurso P-R: DVT2J

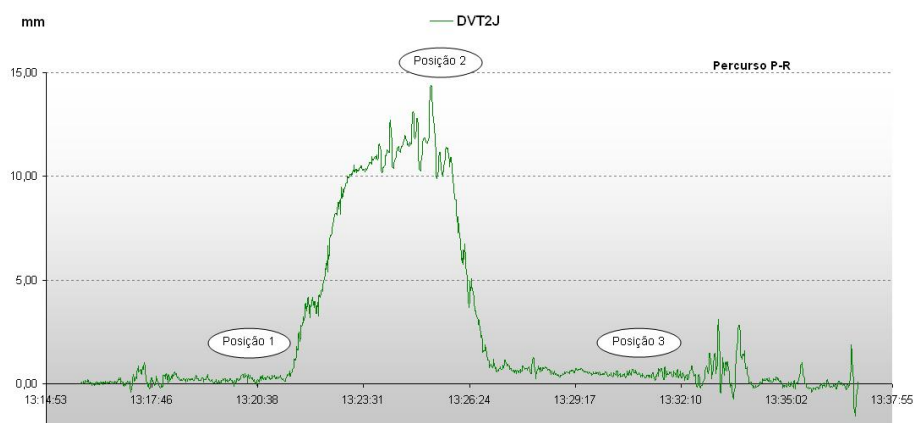


Fig. 4.106 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 2º Tramo medidos do lado de jusante.

Flecha a meio-vão no 1º tramo do lado de montante, no percurso P-R: DVT3M

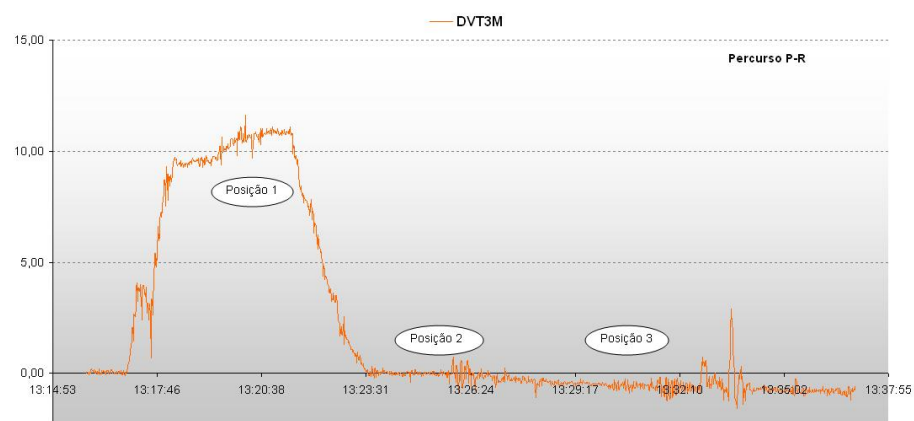


Fig. 4.107 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de montante.

Flecha a meio-vão no 1º tramo do lado de jusante, no percurso P-R: DVT3J

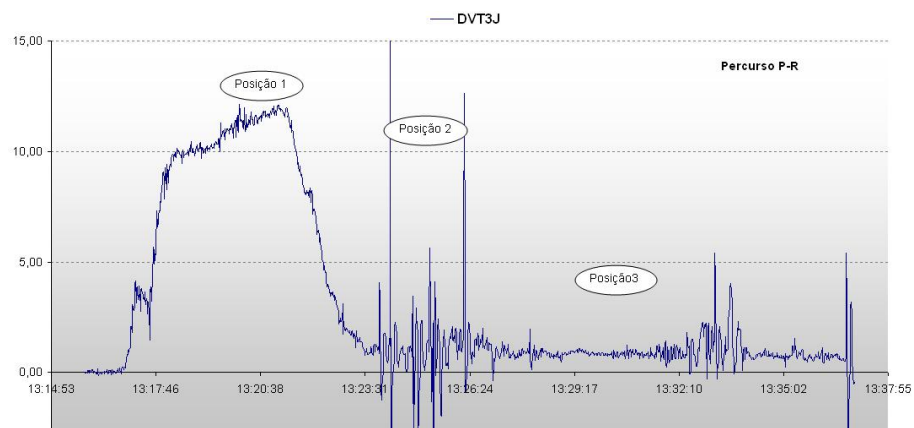


Fig. 4.108 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de jusante.

Flechas a meio-vão do 1º tramo da ponte obtidas por meio de um comparador eléctrico no percurso P-R.

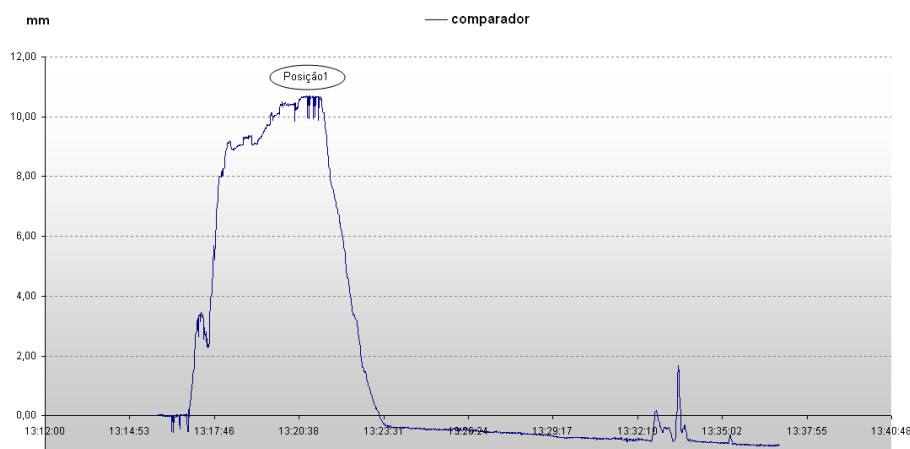


Fig. 4.109 – Deslocamentos verticais a meio-vão do 1º Tramo medidos do lado de montante.

Abertura da junta de dilatação no 1º tramo no pilar P1, no percurso P-R: DHT1M.

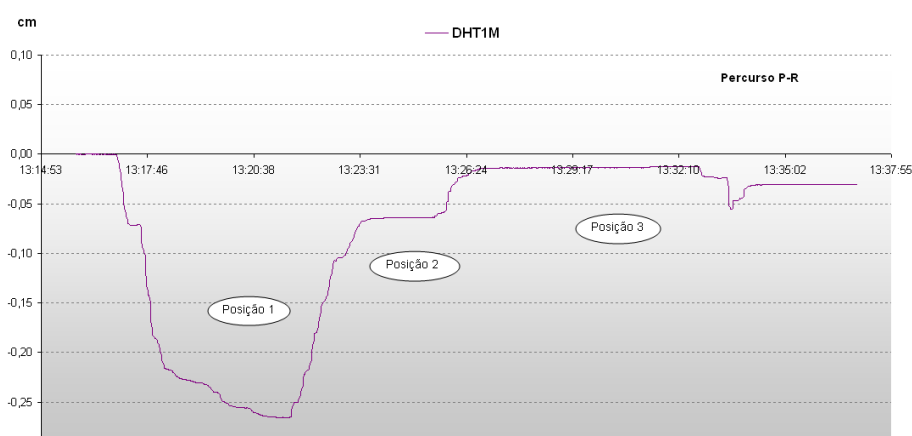


Fig. 4.110 – Abertura da junta de dilatação localizada no 1º tramo sobre o pilar P1 (montante).

Abertura da junta de dilatação no 1º tramo no pilar P1, no percurso P-R: DHT1J.

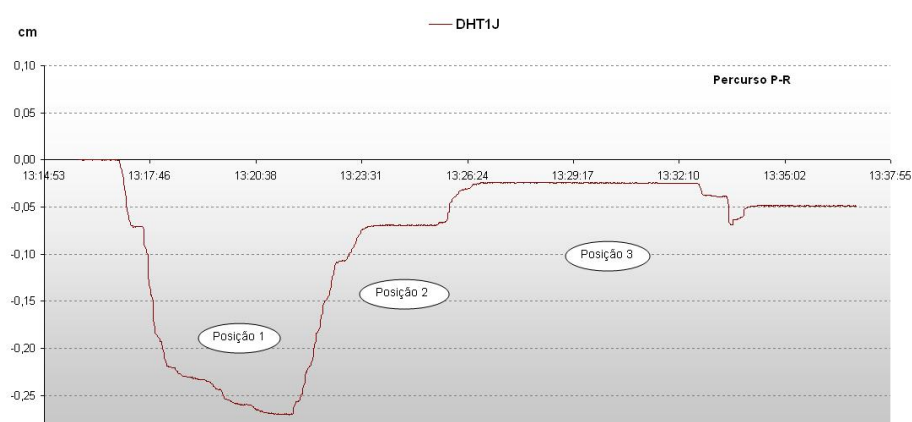


Fig. 4.111 – Abertura da junta de dilatação localizada no 1º tramo sobre o pilar P1 (jusante).

4.5.2 SEGUNDA FASE DO ENSAIO DE CARGA

4.5.2.1 VEÍCULOS UTILIZADOS

Na segunda fase ensaio de carga da ponte foram utilizados três veículos, identificados no Quadro 4.6, cujas características constam na figura e quadros seguintes. Os veículos possuíam apenas seu peso bruto, sem qualquer carga adicional.

Quadro 4.6 – Designação dos veículos.

Designação	Matrícula
A	82-95-PX
B	97-27-OZ
C	41-36-NQ

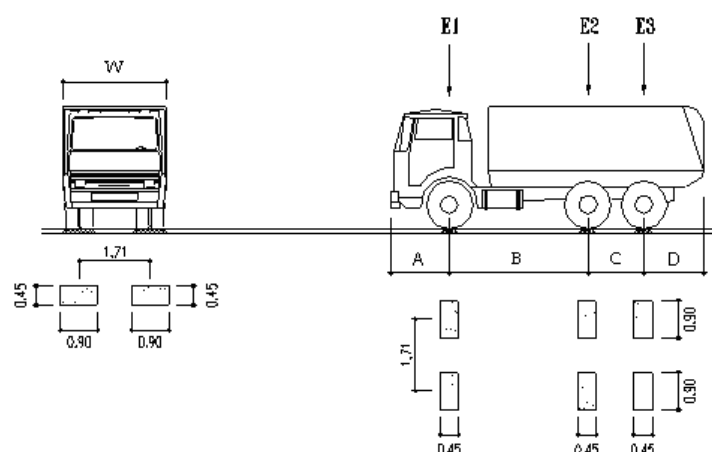


Fig. 4.112 – Características do veículo tipo proposto para o ensaio.

Quadro 4.6 – Características geométricas e peso dos veículos utilizados no ensaio de carga.

Veículo	Dimensões					Peso
	A	B	C	D	W	Tara (t)
A	1,45	4,75	1,35	1,50	1,85	12,32
B	1,40	3,80	1,40	1,50	1,85	12,70
C	1,40	3,80	1,40	1,50	1,85	13,44

Quadro 4.7 – Peso por eixo dos veículos utilizados no ensaio de carga.

Veículo	Peso por eixo [kg]		
	E1	E2	E3
A	6160	3080	3080
B	6350	3175	3175
C	6720	3360	3360

4.5.2.2 CASOS DE CARGA

Foram definidos 3 casos de carga estáticos e 3 passagem no sentido Régua – Pinhão, em que uma das passagens corresponde a uma passagem lenta e outras duas passagens são efectuadas à velocidade normal de circulação. No 1º tramo foi colocada um resalto para obter os efeitos de um ressalto nas últimas duas passagens.

Os casos de carga propostos induzem os valores mais elevados das grandezas a medir nas secções instrumentadas. Para as posições de carga estáticas foram utilizados 3 veículos sobre o tabuleiro.

Nas figuras seguintes são apresentadas as posições longitudinais ocupadas por cada grupo de veículos sobre o tabuleiro durante a condução do ensaio de carga. A figura 4.116 representa a posição dos veículos na secção transversal do tabuleiro. Para garantir que a posição dos veículos imobilizados correspondia efectivamente à desejada, foram efectuadas marcas no pavimento.

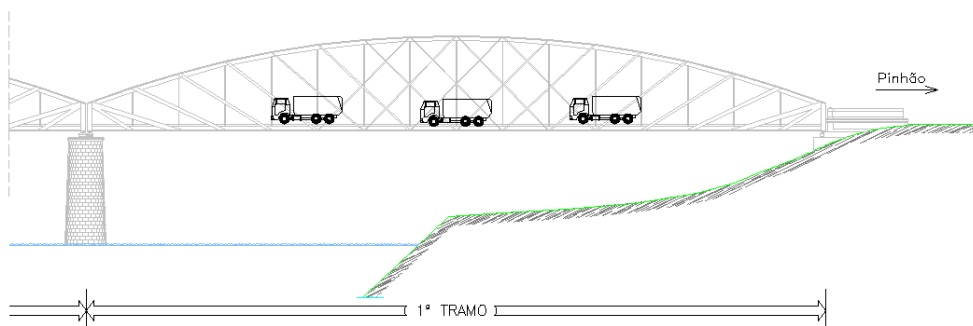


Fig. 4.113 – Caso de carga 1.

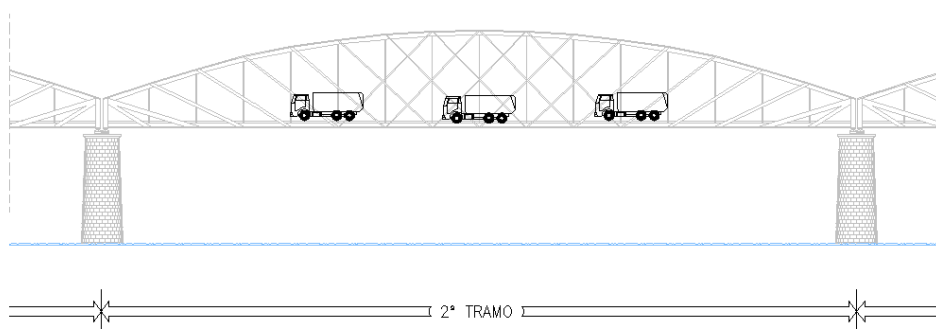


Fig. 4.114 – Caso de carga 2.

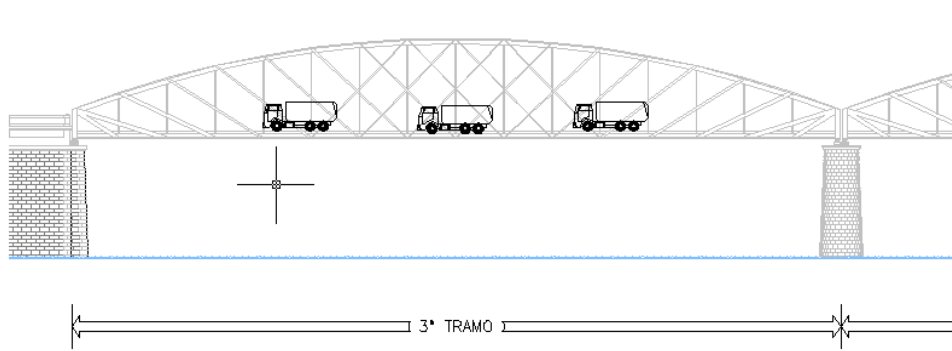


Fig. 4.115 – Caso de carga 3.

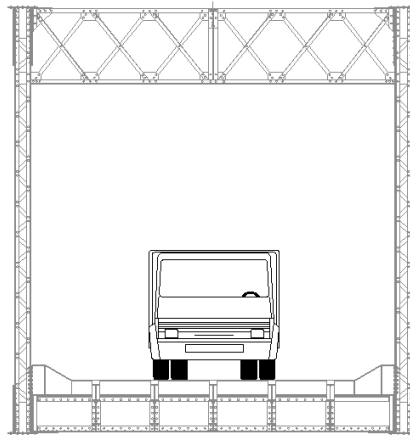


Fig. 4.116 – Posição dos veículos na secção transversal do tabuleiro.



Fig. 4.117 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 1.



Fig. 4.118 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 2.



Fig. 4.119 – Ilustração do ensaio de carga no caso de carga 3.

O quadro 4.8 -Resumo dos principais resultados que se pretende obter para cada uma das posições.

Caso de Carga	Descrição da acção	Resultado pretendido
1º caso	Conjuntos de 3 veículos posicionados 1º tramo da ponte.	Máximo deslocamento vertical no 1º tramo e extensões dos extensómetros do 1º tramo

2º caso	Conjuntos de 3 veículos posicionados no 2º tramo da ponte.	Extensões máxima nas secções instrumentadas no 2º tramo
3º caso	Conjuntos de 3 veículos posicionados a ½ vão do 3º tramo da ponte.	Extensões máxima nas secções instrumentadas no 3º tramo

4.5.1.3 CONDUÇÃO DO ENSAIO

Foram definidos dois períodos de observação, o primeiro período para casos de carga estáticos e o segundo período para cargas dinâmicas.

No primeiro período foram realizados três casos de carga estáticos, um em cada um dos 3 tramos principais da ponte, com 3 camiões centrados transversal e longitudinalmente. No segundo período foram realizadas três passagens, numa delas realizou um atravessamento muito lento para permitir a obtenção de linhas de influência dos vários transdutores instalados, e nas outras duas passagens atravessaram a ponte com uma velocidade semelhante à da circulação normal de veículos pesados, transpondo um ressalto localizado a meio-vão do tramo mais instrumentado (1º tramo).

A medição do zero de referência de todos os sensores com o tabuleiro sem qualquer veículo, situação de vazio, foi feita no início do ensaio e no intervalo entre os períodos referidos e no final do ensaio.

Durante todo o ensaio de carga o sistema de aquisição automático procedeu à aquisição do sinal em contínuo, com aquisições de 100Hz. Registou-se a hora de início e de fim de cada uma das fases relevantes do ensaio, nomeadamente a situação de vazio e imobilização dos veículos sobre o tabuleiro nas posições definidas. O quadro seguinte resume a sequência das situações observadas durante o ensaio de carga com a indicação da hora de início e de fim de cada uma delas. Esta informação é útil para a interpretação dos gráficos que contém a evolução das medições efectuadas neste período. O ensaio de carga teve início às 11:50:00 horas e terminou às 12:27:00 horas.

Quadro 4.9 – Sequência do ensaio de carga.

Sentido	Descrição das fases de observação	Hora inicial	Hora final
	Vazio	11:50:00	11:51:30
P-R	Posição 1	11:53:00	11:55:00
	Posição 2	11:57:30	11:59:30
	Posição 3	12:01:00	12:03:00
	Vazio	12:04:00	12:06:00
R-P	Passagem lenta	12:13:00	12:17:00
	1ª passagem com ressalto	12:25:00	12:26:00
	2ª passagem com ressalto	12:26:00	12:27:00
	Vazio	12:27:00	12:28:00

O registo das medições para situação de vazio (estrutura descarregada), nas duas fases do ensaio (início de cada percurso e no final), permitiu observar o efeito da variação da temperatura sobre a estrutura e sobre o próprio sistema de medição. Esta informação é útil no tratamento dos valores da medição associados a cada posição dos veículos (imobilizados) sobre a ponte. Nomeadamente foi possível estabelecer a evolução dos zeros de referência ao longo do período de observação.

4.5.2.4 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Apresenta-se nesta secção os resultados da medição efectuada em obra durante a condução da segunda fase do ensaio de carga. Conforme exposto anteriormente, para o ensaio de carga estático foram definidas 3 posições dos veículos estacionados sobre a ponte, e três passagens. Na presente tese só se fera o estudo das cargas estática, uma vez que apenas a análise estática corresponde ao objectivo fixado. Além das situações de carregamento registou-se ainda o sinal dos sensores em três situações de vazio, no início do ensaio, no final e durante um período intermédio. A medição foi feita em contínuo, desde o início até ao fim do ensaio, com uma aquisição de 100Hz.

A ordem por que são apresentados os casos de carga está de acordo com a sequência adoptada para as posições dos veículos no decorrer do ensaio de carga. Os resultados que a seguir se apresentam traduzem a variação de cada uma das grandezas medidas em relação à primeira leitura efectuada.

Nos gráficos são apresentados, no interior de círculos, o número das posições que os veículos ocuparam em cada momento. Na secção seguinte procede-se a um tratamento desta informação, com especial relevo para a correcção dos valores de referência (zero dos sensores a atribuir a cada fase) com vista à obtenção do valor de medição de cada sensor para cada caso de carga. São apresentados, no Anexo B, quadros que resumem a medição relativa aos diferentes percursos. Para cada uma das fases deste percurso, são apresentados os resultados de um estudo estatístico que inclui grandezas como a média, os valores máximos e mínimos da medição, o desvio padrão e o número de leituras (amostras) efectuadas durante cada fase do ensaio.

De seguida serão representados os resultados dos diferentes inclinómetros, sensores de temperatura e extensómetros, procedendo a um tratamento de sinal, tratamento este, que consiste na conversão da aquisição de 100 Hz para uma apresentação gráfica de 1Hz. Os resultados dos extensómetros serão agrupados, pelos tipos de elementos onde estão instalados, cordas inferiores; cordas superiores; diagonais; montantes; carlingas e longarinas.

Extensões obtidas pelos sensores instalados em todas as cordas inferiores.

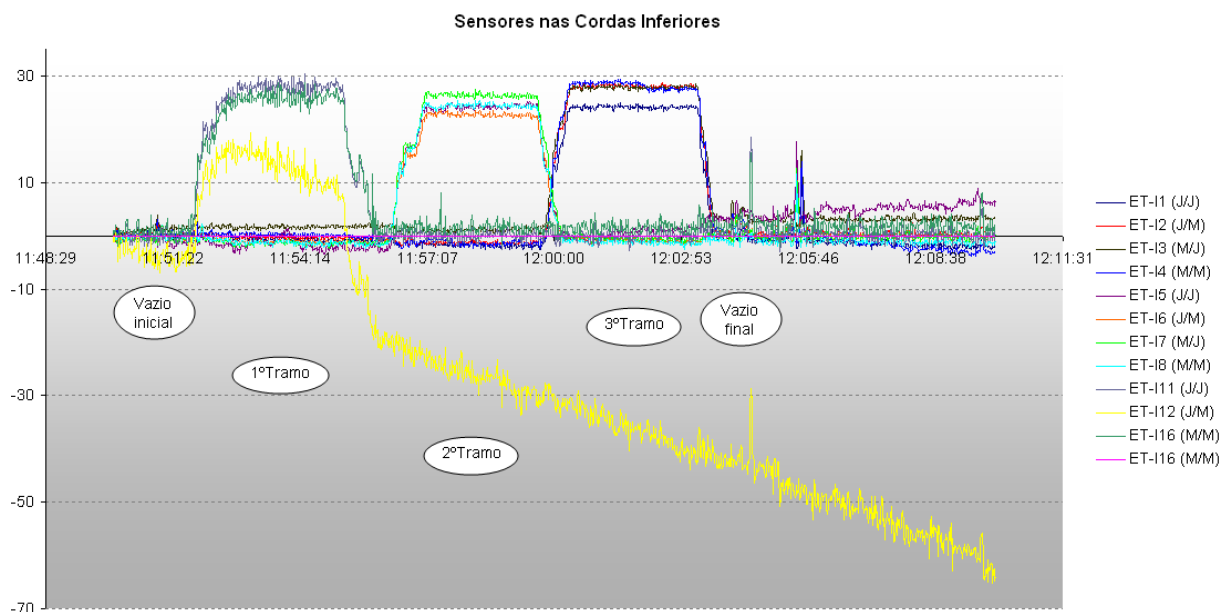


Fig. 4.120 – Extensões nas cordas inferiores em todos os tramos.

Extensões obtidas pelos sensores instalados nas cordas superiores do 1ºtramo.

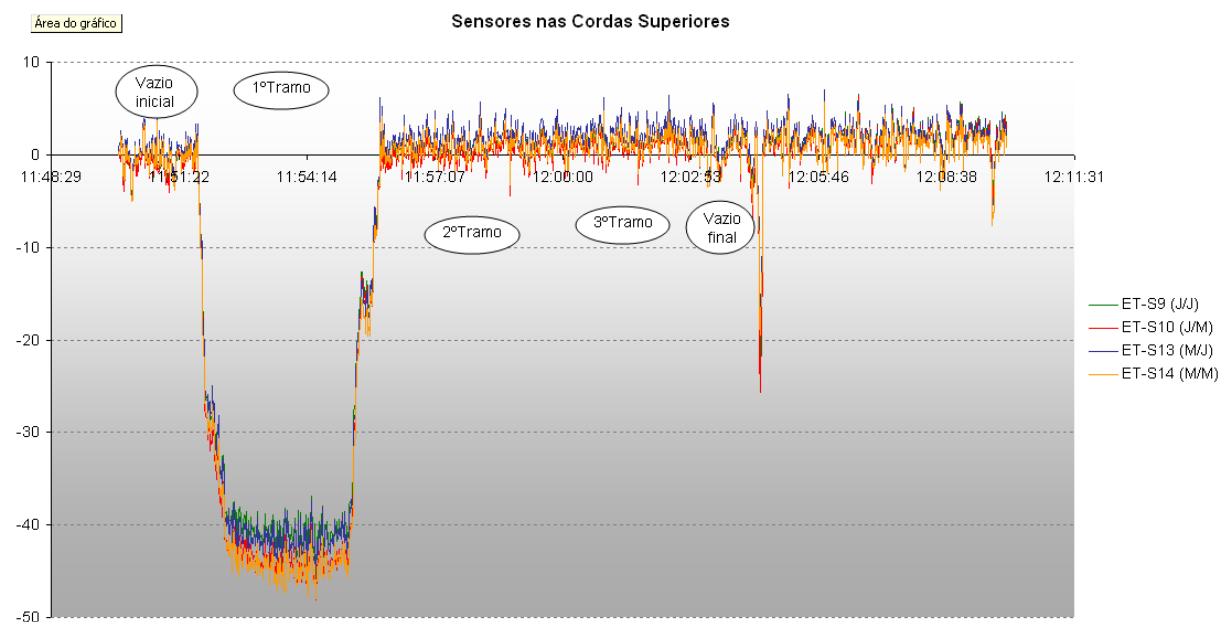


Fig. 4.121 – Extensões nas cordas superiores no 1º tramo.

Extensões obtidas pelos sensores instalados nas diagonais do 1º tramo.

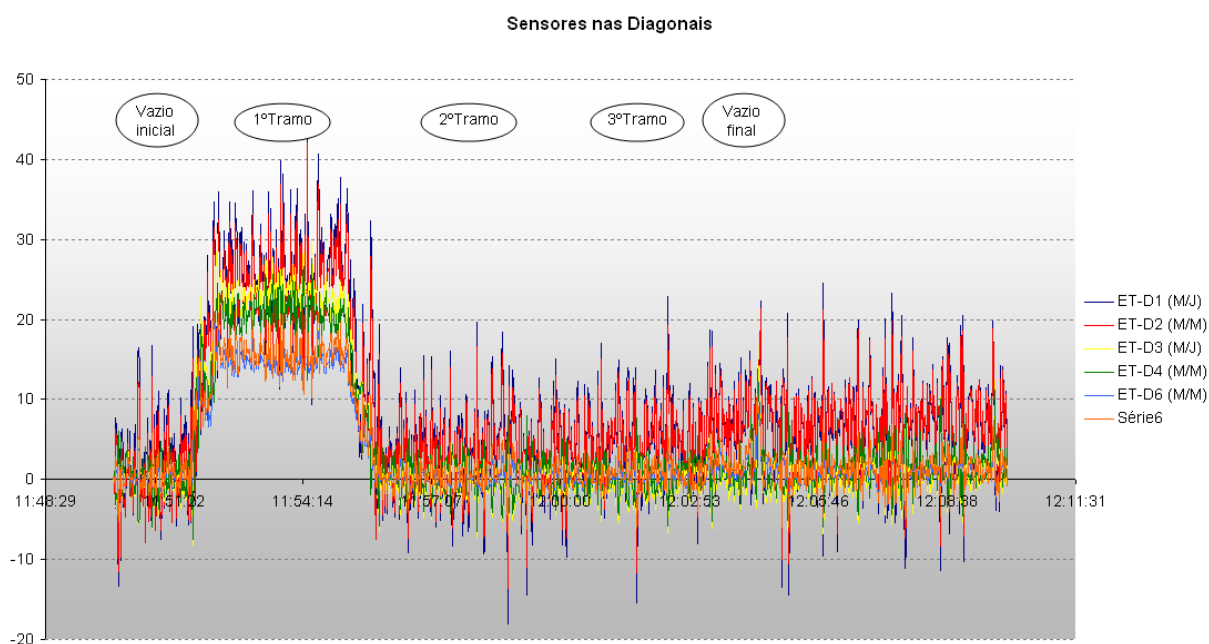


Fig. 4.122 – Extensões nas diagonais no 1º tramo.

Extensões obtidas pelos sensores instalados nos montantes no 1º tramo.

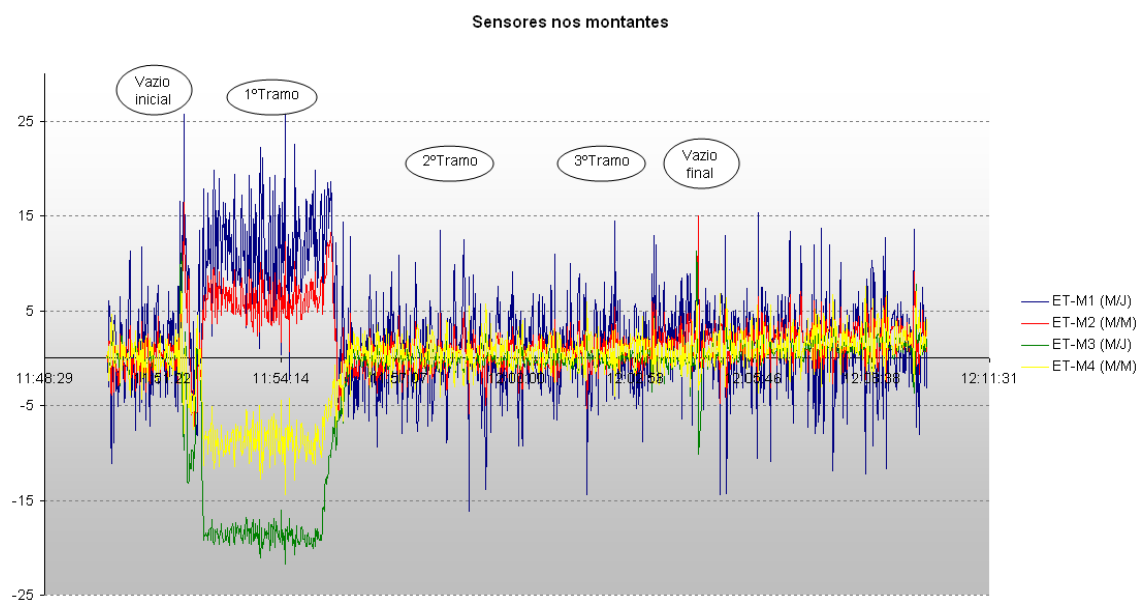


Fig. 4.123 – Extensões nos montantes no 1º tramo.

Extensões obtidas pelos sensores instalados nas carlingas no 1º tramo.

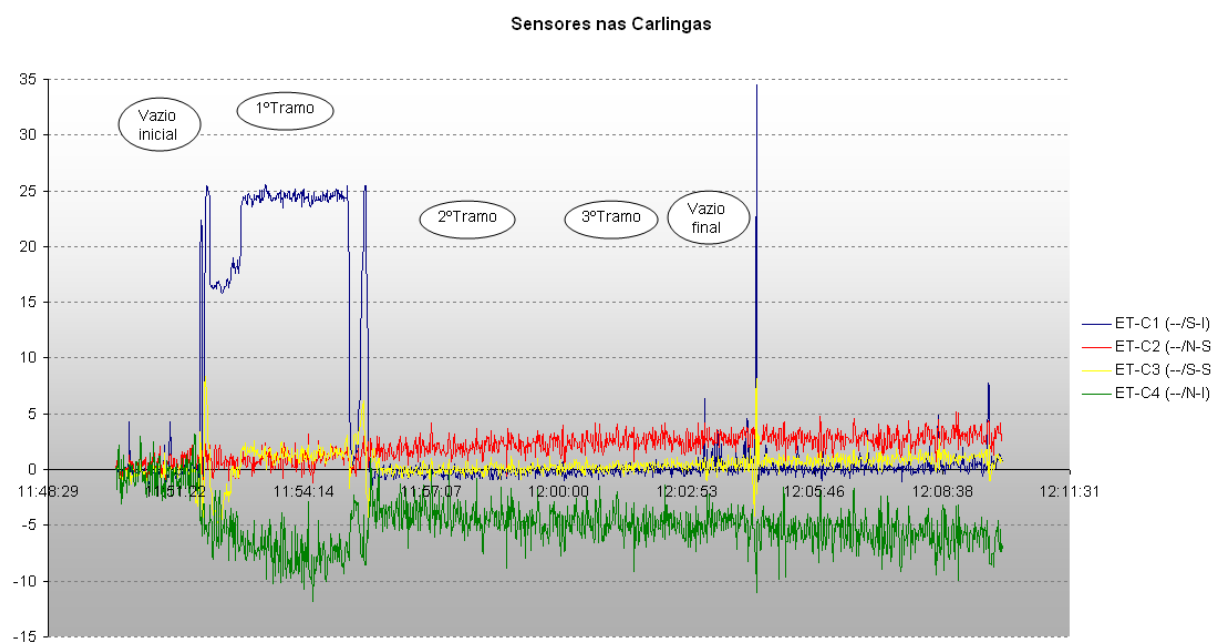


Fig. 4.124 – Extensões nas carlingas no 1º tramo.

Extensões obtidas pelos sensores instalados nas longarinas no 1º tramo.

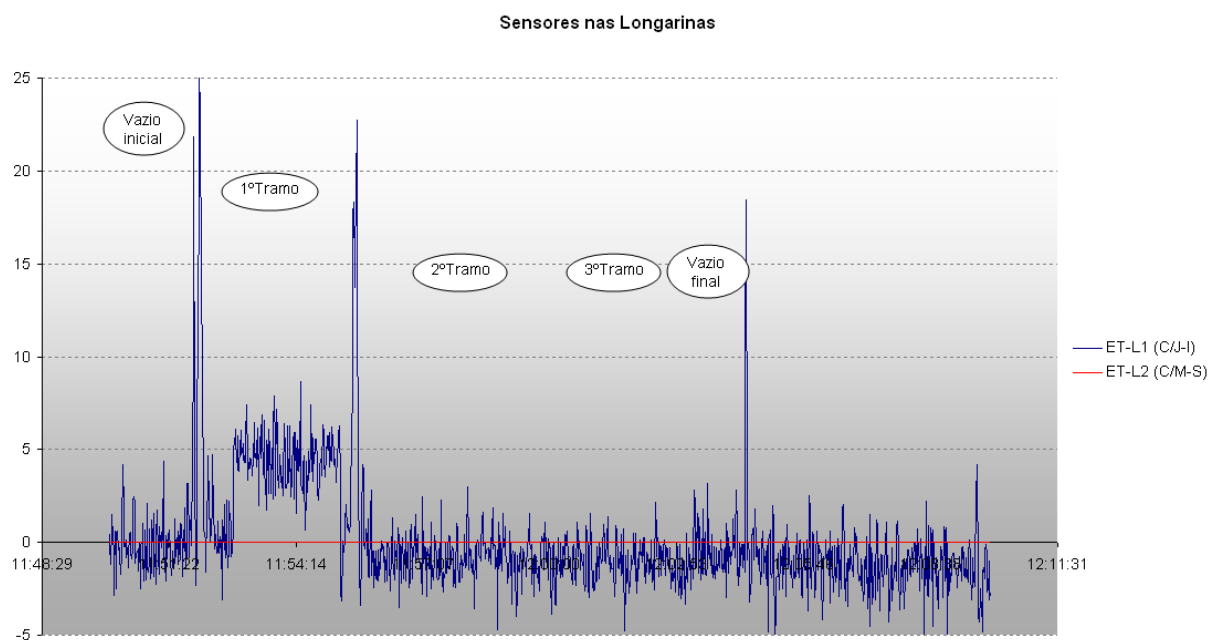


Fig. 4.125 – Extensões nas cordas superiores no 1º tramo.

Temperatura

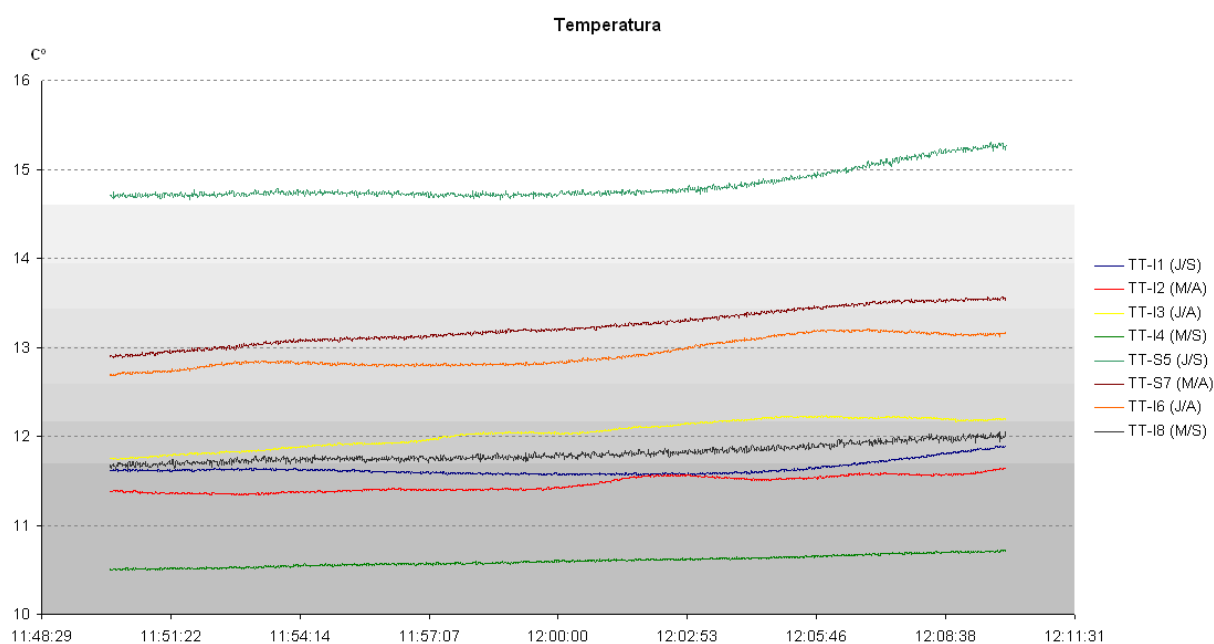


Fig. 4.126 – Temperatura obtida pelos diferentes sensores durante a realização do ensaio.

Rotações.

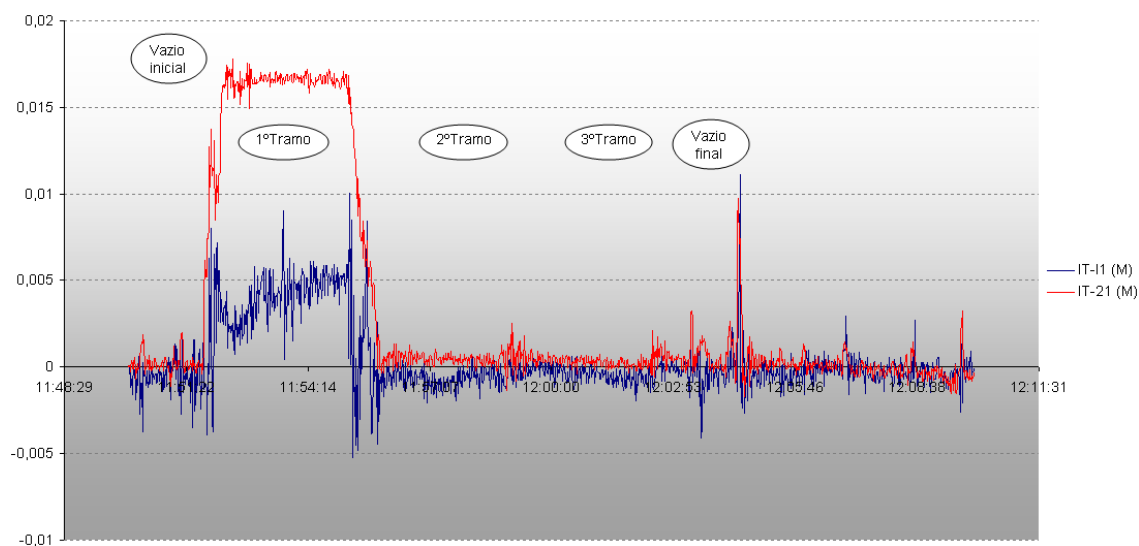


Fig. 4.127 - Rotações obtida pelos diferentes inclinómetros.

4.6 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS COM O AUXÍLIO DE UM MODELO NUMÉRICO DE ANÁLISE

4.6.1 INTRODUÇÃO

Para o estudo do comportamento estrutural da Ponte do Pinhão em condições de serviço, utilizou-se um modelo numérico, para interpretar os resultados obtidos em obra dos diferentes sensores, modelo esse que serviu também para eventualmente preparar o ensaio de carga.

Com a análise numérica da estrutura foi possível otimizar a instrumentação efectuada, em particular na selecção e localização das secções a observar, e também estimar a grandeza das flechas e extensões para os diferentes carregamentos do ensaio de carga, como também para uma estimativa das extensões das várias secções instrumentadas.

4.6.2 MODELO DE ANÁLISE

O modelo numérico utilizado para a análise do comportamento estrutural é baseado no Método de Elementos Finitos, discretizando a estrutura em painéis e elementos de barra com distribuição especial tridimensional com continuidade nos nós. A definição da geometria da estrutura, das condições de apoio e das secções transversais das barras baseou-se no projecto original e na respectiva confrontação com o observado em obra (Fig. 4.128 e Fig. 4.129).

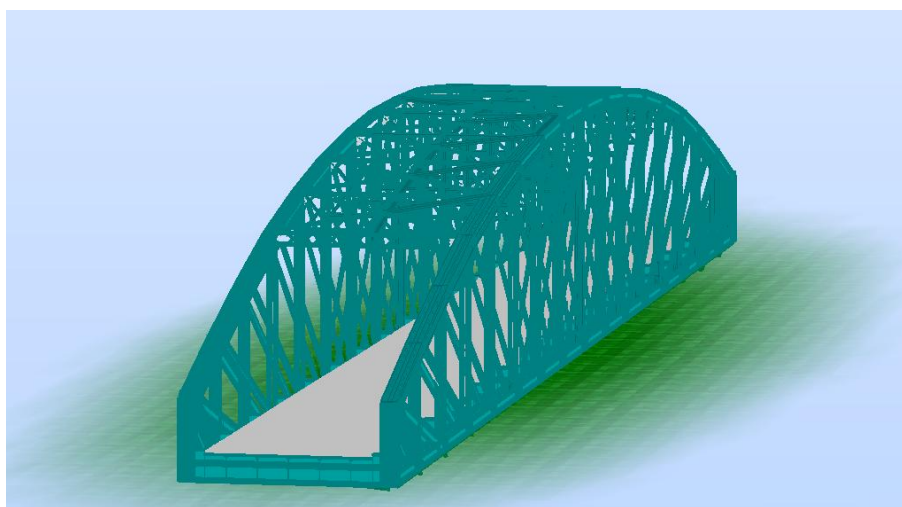


Fig. 4.128 – Perspectiva da estrutura simulada pelo modelo numérico.

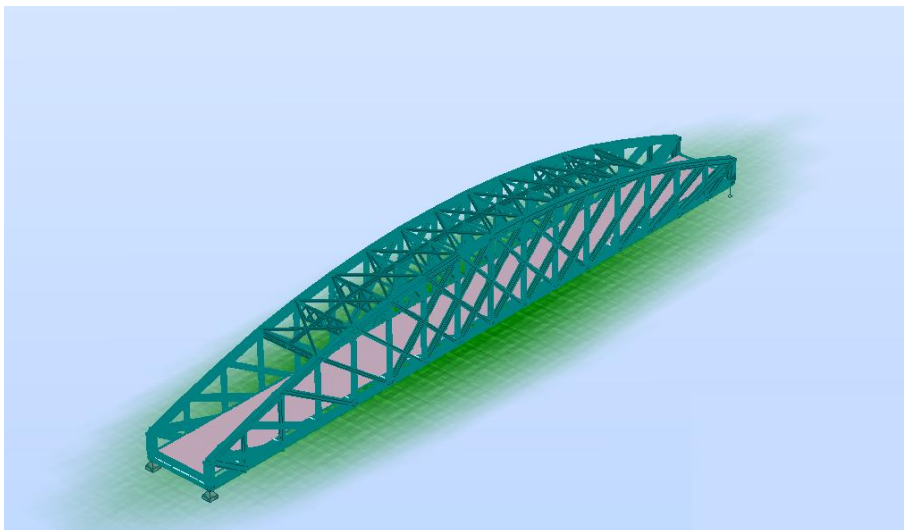


Fig. 4.129 – Modelo numérico de um vão da estrutura da ponte.

Os materiais utilizados na modelação consistem no betão da laje de pavimento e também no aço utilizados nos perfis, houve o cuidado de se distinguir o aço já existente e o aço utilizado no reforço, para o aço foi considerado um comportamento elástico linear.

O módulo de elasticidade adoptado para o aço de reforço da ponte do Pinhão foi de 200GPa e para o aço existente desde do início da construção da ponte foi realizado em laboratório um ensaio de uma amostra recolhida em obra, para determinar o seu módulo de elasticidade (fig. 4.131), na figura 4.132 representa-se a relação entre a tensão e extensão, na qual se conclui que o módulo de elasticidade do aço é de 168GPa.



Fig. 4.130 – Ilustração do ensaio.

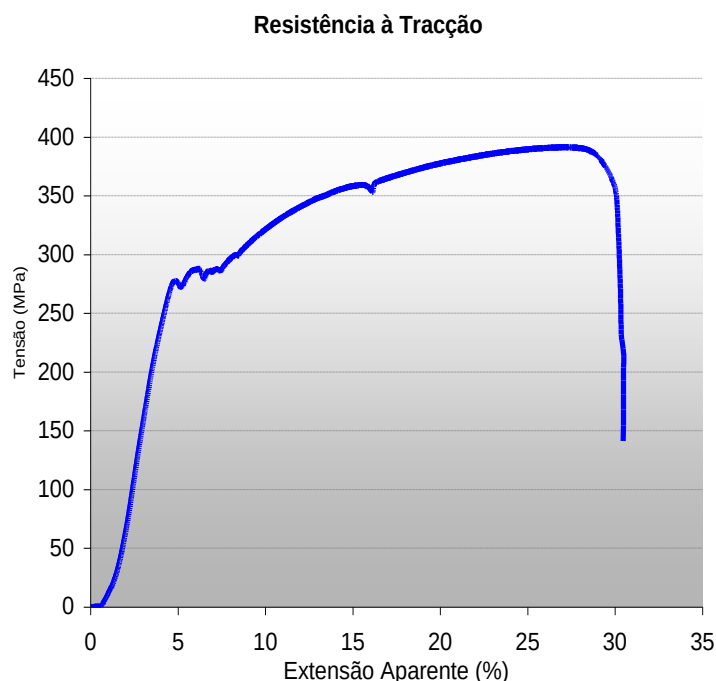


Fig. 4.131 – Representação gráfica do diagrama tensão/extensão do aço da Ponte do Pinhão.

4.6.3 INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICO

Ao comparar o comportamento global da estrutura a partir do modelo numérico descrito, considerando acções equivalentes às aquelas aplicadas durante o ensaio de carga, nas posições de interesse, constata-se que o erro observado varia entre 0,52% e 32,14%. Nos quadros apresentados a seguir, é possível verificar os valores medidos mais importantes, para cada uma das peças instrumentadas para os diferentes sensores, possibilitando a comparação dos valores obtidos durante o ensaio de carga com os correspondentes do modelo numérico utilizado.

É possível observar que as hipóteses adoptadas por ocasião da construção do modelo proporcionaram bons resultados em relação ao comportamento global da estrutura, sendo bastante relevante, no âmbito das deformações obtidas, notando que para praticamente todas as peças instrumentadas, os resultados apresentam-se bastante coerentes com o que foi observado durante o ensaio. A figura seguinte representa a deformada da estrutura para os casos de carga 1, 2 e 3.

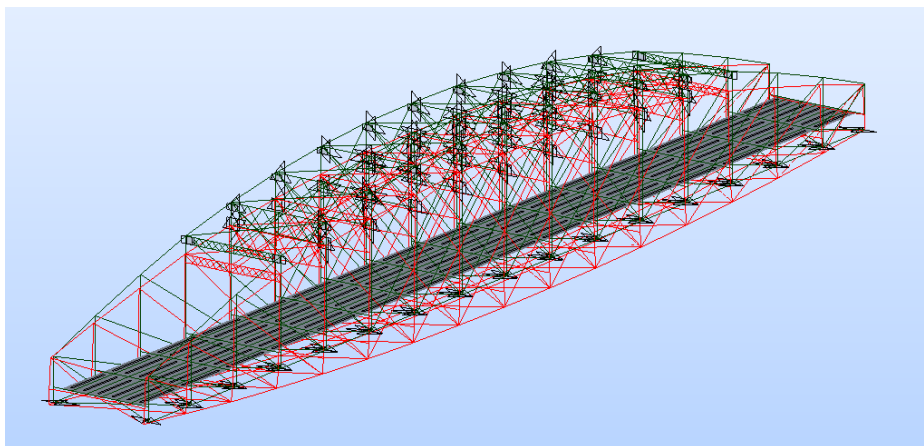


Fig. 4.132 – Deformação da estrutura para os casos de carga 1, 2 e 3.

Deslocamentos verticais

A comparação entre os valores experimentais e numéricos é estabelecida no Quadro 4.10, para os casos de carga em que se obtiveram as flechas máximas a meio vão dos diferentes tramos.

Quadro 4.10 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos dos deslocamentos verticais.

Sentido R-P	Sensor	DVT1M	DVT1J	DVT2M	DVT2J	DVT3M	DVT3J	Comparador
	Posição	1/2 vão 3ºtramo	1/2 vão 3ºtramo	1/2 vão 2ºtramo	1/2 vão 2ºtramo	1/2 vão 1ºtramo	1/2 vão 1ºtramo	1/2 vão 1ºtramo
	Caso de carga	3	3	2	2	1	1	1
	Experimental (mm)	11,50	10,62	9,55	10,24	11,01	10,08	10,75
	Numérico (mm)	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95
	Erro (%)	5,03%	-2,98%	-12,75%	-6,47%	0,52%	-7,93%	-1,83%
Sentido P-R	Sensor	DVT1M	DVT1J	DVT2M	DVT2J	DVT3M	DVT3J	Comparador
	Posição	1/2 vão 1ºtramo	1/2 vão 1ºtramo	1/2 vão 1ºtramo	1/2 vão 1ºtramo	1/2 vão 1ºtramo	1/2 vão 1ºtramo	1/2 vão 1ºtramo
	Caso de carga	3	3	2	2	1	1	1
	Experimental (mm)	11,28	10,86	11,42	11,64	10,79	11,66	10,75
	Numérico (mm)	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95
	Erro (%)	3,04%	-0,85%	4,26%	6,31%	-1,45%	6,51%	-1,83%

Deslocamentos horizontais

A comparação dos deslocamentos horizontais entre valores experimentais e os valores numérico está estabelecida no quadro 4.11

Quadro 4.11 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos dos deslocamentos horizontais.

Sentido	Sensor	Posição	Caso de carga	Experimental (mm)	Numérico (mm)	Erro (%)
R-P	DHT1M(1)	1/2 Vão 1º tramo	1	2,3	2,96	28,70%
	DHT1J(1)			2,24	2,96	32,14%
P-R	DHT1M(1)			2,55	2,96	16,08%
	DHT1J(1)			2,55	2,96	16,08%

Rotações

A comparação das rotações para os diferentes ensaios entre valores experimentais e os valores numérico está estabelecida no quadro 4.12.

Quadro 4.12 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos das rotações.

Fase do ensaio	Sensor	Sentido	Caso de carga	Experimental	Numérico	Erro (%)
1º	I2(1)	Longitudinal	1º tramo	$29,72 \times 10^{-3}^\circ$	$29,27 \times 10^{-3}^\circ$	1,51%
2º	I2(2)	Longitudinal	1º tramo	$16,30 \times 10^{-3}^\circ$	$14,77 \times 10^{-3}^\circ$	-9,37%
	I1(2)	Transversal	1º tramo	$5,06 \times 10^{-3}^\circ$	$4,37 \times 10^{-3}^\circ$	-13,52%

Extensões

A comparação das extensões entre valores experimentais e os valores numérico está estabelecida no quadro 4.13.

Quadro 4.13 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos das extensões.

Secção	Extensómetro	Caso de carga	Valor máximo medido	Resultado análise numérica	Erro (%)
S1	ET-I1 (J/J)	3	24,370	31,544	29,44%
	ET-I2 (J/M)		26,943	32,076	19,05%
S2	ET-I3 (M/J)	3	24,235	32,186	32,81%
	ET-I4 (M/M)		27,595	31,654	14,71%
S3	ET-I5 (J/J)	2	22,389	31,654	41,38%
	ET-I6 (J/M)		22,745	32,186	41,51%
S4	ET-I7 (M/J)	2	26,418	32,186	21,83%

	ET-I8 (M/M)		24,957	31,654	26,83%
S5	ET-D1 (M/J)	1	22,389	24,388	8,93%
	ET-D2 (M/M)		22,282	21,063	-5,47%
S6	ET-L1 (C/J-I)	1	4,683	21,282	354,50%
	ET-L2 (C/M-S)		-	1,231	-
S7	ET-S9 (J/J)	1	-40,713	-42,063	3,32%
	ET-S10 (J/M)		-43,530	-41,411	-4,87%
S8	ET-S13 (M/J)	1	-42,143	-41,411	-1,74%
	ET-S14 (M/M)		-44,312	-42,075	-5,05%
S9	ET-I11 (J/J)	1	27,871	32,337	16,02%
	ET-I12 (J/M)		25,364	32,708	28,95%
S10	ET-I15 (M/J)	1	24,773	32,710	32,04%
	ET-I16 (M/M)		-	32,337	-
S11	ET-C1 (--/S-I)	1	24,377	30,795	26,33%
	ET-C2 (--/N-S)		-	5,751	-
S12	ET-C3 (--/S-S)	1	1,400	-3,630	-359,31%
	ET-C4 (--/N-I)		-6,029	-4,148	-31,20%
S13	ET-M1 (M/J)	1	10,199	13,429	31,68%
	ET-M2 (M/M)		5,462	4,984	-8,75%
S14	ET-D3 (M/J)	1	22,633	27,059	19,55%
	ET-D4 (M/M)		20,374	26,291	29,04%
S15	ET-M3 (M/J)	1	-18,719	-9,261	-50,53%
	ET-M4 (M/M)		-8,917	-10,066	12,89%
S16	ET-D5 (M/J)	1	14,305	17,905	25,16%
	ET-D6 (M/M)		15,029	17,571	16,91%

É de salientar a existência de algumas das secções instrumentadas terem uma correlação baixa entre os valores experimentais e numéricos. A grande diferença entre os valores numéricos e experimentais deve-se como é caso nas cordas inferiores, ao facto dos extensómetros terem sido colocados muito próximos do nó, o que dificulta a obtenção de valores representativos das extensões nas barras. Outro caso em que a localização dos extensómetros não foi a mais adequada, trata-se das secções S14 e S16 correspondente aos extensómetros ET-D3, ET-D4, ET-D5 e ET-D6 instalados em diagonais, devido ao facto destes mesmos serem colocados muito próximos da chapa de ligação, o que origina uma perturbação na informação da deformação. Existem outros casos particulares como é exemplo, os extensómetros colocados nas longarinas e carlingas, a sua baixa correlação entre os valores obtido por via experimental e numérico não se deve ao seu posicionamento propriamente dito, mas sim a sua sensibilidade à localização da carga. Assim devido, ao facto de existir dificuldade em garantir o correcto posicionamento das cargas no ensaio, justifica a sua menos boa correlação.

O facto das extensões medidas experimentalmente serem em geral semelhantes às obtidas pelo modelo implica que as premissas consideradas na geração do mesmo são potencialmente válidas.

A hipótese da elasticidade linear assumida adquire assim bastante credibilidade quanto à aplicação neste caso, permitindo-se concluir que as cargas introduzidas durante o ensaio não induziram plastificação das secções mais esforçadas dos perfis metálicos da estrutura, pois de outro modo seria de prever que os valores medidos fossem significativamente superiores aos obtidos pelo modelo elástico. Pelo contrário podemos dizer que os valores observados para as extensões são de um modo

geral muito baixos, correspondendo a valores pouco significativos da grande medida, pelo que os erros observados são mais elevados.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as várias actividades e resultados relacionados para cada uma das fases do ensaio de carga para avaliação do comportamento da ponte do Pinhão, sobre o Rio Douro. A ponte apresenta três tramos e é constituída fundamentalmente por uma estrutura metálica composta por chapas e cantoneiras e tabuleiro misto aço-betão, apoiada em três pilares e dois encontros de alvenaria de pedra. Foram medidas deformações em secções das barras metálicas, flechas a meio-vão de cada tramo e em elementos estruturais seleccionados, rotações e aberturas de junta (deslocamento dos aparelhos de apoio). A medição da temperatura completa o sistema de instrumentação para avaliar os efeitos das acções aplicadas à estrutura. A acção aplicada ao tabuleiro da ponte para a primeira fase do ensaio de carga foi efectuada com a utilização de sete veículos, na segunda fase do ensaio de carga foi efectuada com a utilização de três veículos, cada um pesando aproximadamente 12 toneladas.

A aquisição do sinal de todos os sensores instalados foi totalmente automatizada com a concentração e armazenamento da medição num postos de observação provisório (PO3) na primeira fase de ensaio de carga e em dois postos de observação definitivos (PO1 e PO2) na segunda fase do ensaio de carga, e a sua ligação a um computador junto à obra em ambas as fases do ensaio de carga, permitiu o acompanhamento em tempo real das medições que iam sendo efectuadas. O factor “erro humano” não teve assim, directamente, interferência na quantificação das grandezas medidas e expressas nos gráficos e quadros apresentados.

Em face dos resultados obtidos e especificados no presente projecto, é possível concluir que, para os carregamentos introduzidos durante o ensaio de carga, a estrutura da Ponte do Pinhão apresentou comportamento em conformidade com o esperado.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

O trabalho que agora finaliza constitui uma contribuição para o conhecimento das potencialidades dos sistemas de monitorização na interpretação e diagnóstico do comportamento de uma estruturas e também aprofundando o estudo das capacidades de um sensor de monitorização. O tema do presente trabalho está enquadrado pela reconhecida necessidade de avaliação do comportamento estrutural das obras durante a fase de exploração, com vista ao aumento do seu período de vida útil em condições de segurança e de eficiência económica. A pertinência do tema resulta também das dificuldades que se têm verificado na manutenção das inúmeras estruturas centenárias que continuam ao serviço, em condições de segurança nem sempre conhecidas. Sendo elevados os custos associados à gestão e conservação corrente de obras de arte, eles são incalculáveis nas situações de acidente, onde acima de tudo, se coloca em risco a vida dos utentes. A segurança estrutural de pontes e viadutos é pois um desígnio nacional, ao qual a engenharia portuguesa dedicará, certamente, a sua mais cuidada atenção.

Desde a década de 50 até à actualidade a observação das estruturas tem experimentado uma enorme evolução. Inicialmente desenvolvida para a análise do comportamento de modelos à escala reduzida, foi depois utilizada em medições discretas em estruturas reais, em determinados períodos da vida da obra. Actualmente são aplicados sistemas que, em permanência, vigiam o comportamento da estrutura, onde a presença de técnicos é frequentemente dispensada e substituída por automatismos. Os instrumentos de medição puramente mecânicos deram origem aos eléctricos, assim como estes estão a dar lugar aos sistemas baseados na electrónica e na opto-electrónica. Os actuais sistemas de comunicação permitem o contacto remoto e permanente com as obras, e o desenvolvimento de software de gestão de dados viabilizará em breve a criação de centrais de observação, concentrando a informação relevante de todo o parque construído adstrito a um dado gestor. É com base nestas experiências, e na exploração das potencialidades dos mais recentes sistemas de monitorização, que está a surgir o conceito de estruturas inteligentes.

No capítulo 3 foi discutido os diferentes sensores para a observação e acompanhamento do fenómeno da infraescavação, fazendo-se referencia as vantagens e desvantagens na utilização dos vários sensores. Nesse mesmo capítulo foram feito o estudo a sensibilidade e estabilidade na utilização de um sensor, mais propriamente dito o Sonar, para tal estudo elaboraram-se um conjunto de ensaios em

laboratório e em campo, que permitiram concluir a sua adequabilidade na instrumentação e monitorização de estruturas.

Procedeu-se então à aplicação do conceito de monitorização estrutural a um caso de obra, nomeadamente a Ponte do Pinhão, no capítulo 4.

Tendo em vista o reforço da ponte do Pinhão, foi desenvolvido e aplicado um sistema de monitorização que permitiu observar o seu comportamento no decorrer de um ensaio de carga estático e durante dois períodos de tempo. Neste caso de obra os objectivos principais foram a avaliação do comportamento estrutural no estado actual da ponte. O objectivo foi atingidos, tendo sido possível a interpretação das medições efectuadas com base no modelo numérico desenvolvido. Este modelo foi inicialmente elaborado com base no projecto original, e teve em atenção uma campanha de inspecções a algumas secções acessíveis da ponte e ensaios mecânicos de caracterização do aço.

A intervenção na Ponte do Pinhão realça as virtudes da medição em contínuo, com frequências elevadas, de todos os sensores instalados. Esta informação, cruzada com o registo de início e de fim de cada situação de carregamento, permitiu um posterior tratamento estatístico das medições efectuadas, aumentando a fiabilidade dos resultados. Por outro lado, qualquer variação inesperada de sinal num ou mais sensores no decorrer do ensaio pôde ser mais facilmente identificada, conhecendo-se desde logo a situação de carregamento aquando dessa ocorrência.

A medição em contínuo da extensão, durante mais de duas horas, com o sistema de aquisição CompactRIO com uma frequência de aquisição de 100Hz, permitiu observar o efeito na estrutura da passagem dos veículos. Este estudo demonstrou as potencialidades deste tipo de observação na construção de sistemas de monitorização.

A experiência decorrente do desenvolvimento do presente trabalho permitiu realçar algumas das características essenciais de que devem ser dotados os sistemas de monitorização a instalar em obras. Nomeadamente, deverão ser robustos, fiáveis e de funcionamento autónomo, com capacidade de programação e de armazenamento de informação. 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. Esta será certamente uma área que experimentará em breve um enorme desenvolvimento.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Foi realçada a importância da monitorização e observação das estruturas. A monitorização do comportamento de estruturas tem contribuído para o aumento do conhecimento dos materiais e das estruturas em condições de serviço e em situação em que se aproximam dos valores máximos previstos no projecto. Nos primeiros tempos a observação era quase exclusivamente qualitativa e resultava de simples observações visuais ou inspecções. Hoje estão difundidos sistemas e sensores baseados na electrónica e na opto-electrónica que sustentam o conceito de monitorização do comportamento das estruturas.

Cada vez mais existe o interesse em desenvolver sensores capazes de traduzir o comportamento de estruturas com o máximo de confiança, durabilidade e facilidade na sua aplicação e manipulação.

Os sensores dividem-se em duas grandes “famílias” sensores eléctricos e sensores de fibra óptica. Os sensores de fibra óptica tratam-se de sensores bastante recentes em pleno desenvolvimento.

No âmbito da exploração de novos sensores, surgiu o interesse em desenvolver um sensor em fibra óptica capaz de monitorizar juntas de dilatação, mais propriamente dito juntas de dilatação da Ponte Luiz I que têm deslocamentos na ordem dos 12cm.

No mercado dos sensores de monitorização, existem vários sensores capazes de monitorizar juntas de dilatação, todos eles sensores eléctricos, por isso surgiu todo o interesse em desenvolver um sensor em fibra óptica

Os extensómetros em fibra óptica têm uma sensibilidade de $1\mu\epsilon$ ($1 \times 10^{-6} \text{m/m}$), no entanto pensou-se num sensor capaz de desmultiplicar a sensibilidade de um extensómetro em fibra óptica.

A primeira ideia para desmultiplicar a sensibilidade de um extensómetro de fibra óptica foi com a ajuda de uma mola de compressão. Uma das ideias de concepção do sensor consistia ligar a mola a um pórtico que por sua vez se encontra instrumentado por um extensómetro de fibra óptica, ilustrando-se na figura 5.1 o seu aspecto para o seu futuro desenvolvimento.

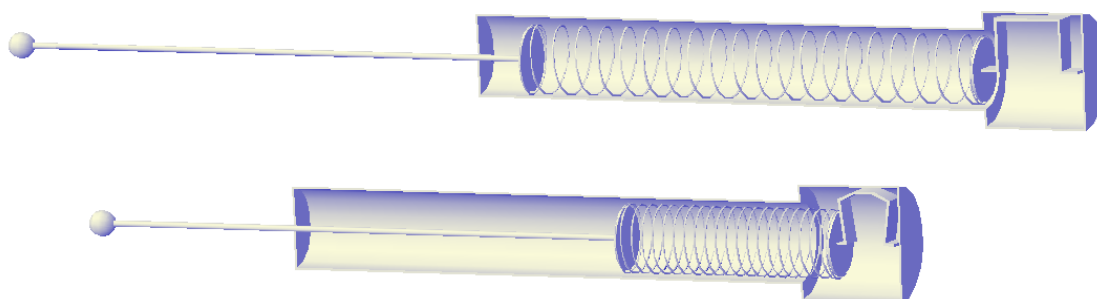


Fig. 5.1 – Ilustração de um possível sistema com ajuda de um pórtico.

Uma segunda ideia de concepção do sensor é instrumentar directamente a mola por um extensómetro em fibra óptica, tendo-se imaginado o seguinte aspecto final do sensor (Fig. 5.2).

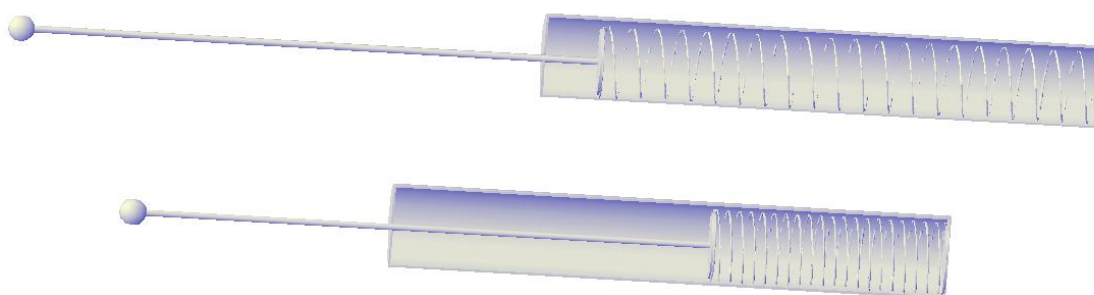


Fig. 5.2 – Ilustração de um sistema na qual a mola se encontra directamente instrumentada.

Por questão de prática e facilidade, optou-se por começar à elaboração do estudo ao sensor no qual se instrumentou directamente a mola. Os resultados obtidos não foram de uma certa forma os mais esperados, ao facto de não existir uma repetição de sinal entre as leituras do extensómetro e deslocamento. À não repetição do sinal deve-se ao atrito gerado entre o contacto da mola e bainha,

então foi necessário pensar numa nova maneira para se contornar esse problema, para isso sugere-se à utilização de uma mola de tracção na qual se encontra ligado a uma consola, que por sua vez se encontra instrumentado por um extensómetro de fibra óptica. Na figura 5.3 ilustra-se o seu aspecto para o seu futuro desenvolvimento. Não foi elaborado qualquer tipo de teste, relacionado com essa última concepção.

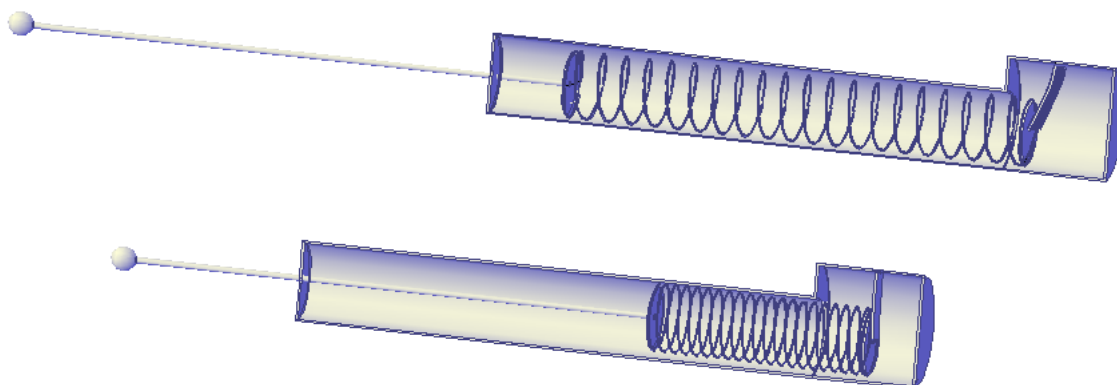


Fig. 5.3 – Ilustração de um sistema na qual a mola se encontra ligada a uma consola instrumentada.

Surgiu outra ideia na concepção de sensores de monitorização, ideia essa de um inclinómetro de fibra óptica. O inclinómetro é composto por uma massa suspensa por dois cabos, que por sua vez os cabos se encontram instrumentados, como ilustra a figura 5.4. O princípio de funcionamento do inclinómetro consiste que no seu estado de repouso ambos os cabos estejam igualmente tencionados, quando o inclinómetro é solicitado por uma rotação os cabos deixam de estar igualmente tencionados, passando um dos cabos a uma tensão superior à tensão de repouso, e que por sua vez o outro cabo passa a uma tensão menor comparada à tensão de repouso. Assim sendo, existe uma variação de extensão dos cabos de suspensão, uma vez que os cabos se encontram instrumentados é possível relacionar a variação de extensão com variação de rotação.

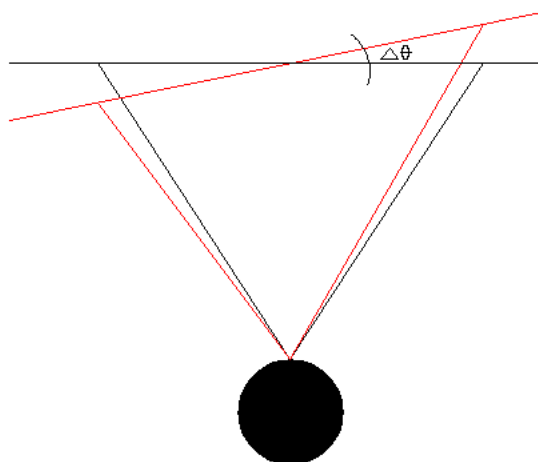


Fig. 5.4 – Ilustração de um possível inclinómetro de fibra óptica.

Não foram elaborados qualquer concepção e qualquer ensaio em laboratório do inclinómetro óptico, baseando-se apenas em conceitos teóricos. As vantagens na concepção futura deste inclinómetro óptico são, ao facto no mercado dos sensores óptico ainda não existirem inclinómetros ópticos, e também tendo a particularidade de certamente absorver frequências de vibração nas quais os sensores estão sujeito na monitorização, ao contrário de alguns inclinómetros eléctricos existentes.

Ficando assim o apelo ao incentivo para o desenvolvimento de novos sensores eléctricos e ópticos capazes de reproduzir nas melhores condições o comportamento estrutural.

BIBLIOGRAFIA

BERGMEISTER, K. e SANTA, U. – Global Monitoring Concepts for Bridges. *Structural Concrete*, vol.2, n.º 1, p.29-39. March, 2001. ISSN 1464-4177.

BASTOS, Ana M. S. – Experimentação como Metodologia de Interpretação do Comportamento de Estruturas de Betão. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. FEUP. 1997.

FÉLIX, Carlos – Monitorização e Análise Comportamento de Obras de Arte. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. FEUP, 2004

QUINTELA, António C.; PROENÇA, Jorge M. – Edgar Cardoso 1913/2000. Fundação Edgar Cardoso e Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do IST. Lisboa. 2001. ISBN 972-95718-1-3.

CARDOSO, Edgar A. M. – Cálculo Experimental de Estruturas com base na Análise de Modelos Reduzidos. Um autoinflunciógrafo mecânico-electrónico e outra aparelhagem. Lisboa. 1968.

ROCHA, Manuel; BORGES, J. Ferry; MARÉCOS, 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, p.1-25. LNEC, Lisboa. Octobre, 1955.

MARÉCOS, J. E. – Arrábida Bridge. Observation of the Structure. Monograph prepared for the inauguration of the Arrábida Bridge. LNEC, Lisboa. 1963.

MARÉCOS, J. E.; CASTANHETA, M. N.; TRIGO, J. T. – Field Observation of Tagus River Suspension Bridge. Journal of the Structural Division. American Society of Civil Engineers, p.555-583. N.Y. U.S.A. 1969.

Hani Nassif, 2002 - Evaluation of Bridge Scour Monitoring Methods, Final report. 2002.

James D. Schall, 2004 - Portable Scour Monitoring Equipment, 2004.

Jean Jacques, Anne, Erwan; 2006 -Jean Jacques LÉVÉNEZ, Anne LEBOURGES-DHAUSSY, Erwan JOSSE – Notions D’acoustique appliquée à l’halieutique et l’écologie aquatique, 2006

Marecos, José, 1986 – The 40 Years of LNEC Experience on Observation and Testing of Bridges and Special Structures, Lisboa, 1986.

Note Technique N°19 – Detection des affouillements – Etat de L’art- Empreitada de concepção, projecto e construção da travessia do Tejo no Carregado, no sublanço A1 / Benavente, da A10 – Auto-estrada Bucelas / Carregado / IC3

FÉLIX, Carlos; FIGUEIRAS, Joaquim A. – Observação Laboratorial do Comportamento de um Sensor de Fibras Ópticas. Relatório Interno do Laboratório de Estruturas. FEUP. Novembro, 1999.

FÉLIX, Carlos; FIGUEIRAS, Joaquim A. – Instrumentação e Observação do Comportamento da Ponte Luiz I durante o Ensaio de Carga. Relatório Técnico. LABEST, FEUP. Maio, 2002.

FÉLIX, Carlos; PIMENTEL, Mário; FARIA, Rui M.; FIGUEIRAS, Joaquim A. – Monitorização do Comportamento da Ponte Luiz I durante o Ensaio de Carga. Congresso Nacional da Engenharia de Estruturas, p.383-392. LNEC, Lisboa. Julho, 2002.

FÉLIX, Carlos – Monitorização do Comportamento de Estruturas de Betão. Dissertação para Concurso a Professor Coordenador do ISEP. Porto. Abril, 2002.

FÉLIX, Carlos; PIMENTEL, Mário; FARIA, Rui M.; FIGUEIRAS, Joaquim A. – Monitorização do Comportamento do Viaduto sobre a VCI durante o Ensaio de Carga. Betão Estrutural 2002, p.371-380. LNEC, Lisboa. Novembro, 2002. ISBN 972-9027-69-2.

FIGUEIRAS, Joaquim A.; FÉLIX, Carlos – Monitorização do Viaduto sobre a VCI no Porto. Relatório Sumário de Observação. Laboratório de Estruturas, FEUP. 2001.

WAYNE, Assis; DIMANDE, Américo; Costa, Bruno; FELIX, Carlos; FIGUEIRAS, Joaquim – Instrumentação e observação do comportamento da ponte do Pinhão durante ensaio de carga. Relatório Sumário de Observação. Laboratório de Estruturas, FEUP. 2004.

CAVADAS, Filipe; RODRIGUES, Carlos; FÉLIX, Carlos; FIGUEIRAS, Joaquim – Instrumentação e Observação do Comportamento da Ponte Eiffel durante os Ensaios de Recepção – Relatório técnico. LABEST, FEUP. Fevereiro, 2008.

DIMANDE, Américo; COSTA, Bruno; SILVA, Hélder; FELIX, Carlos; FIGUEIRAS, Joaquim – Instrumentação e Observação do Viaduto Metálico Sobre a VCI durante o Ensaio de Carga – Relatório técnico. LABEST, FEUP. Setembro, 2004.

ANEXO A

RESULTADOS COMPLEMENTARES DA MEDIÇÃO:

TRATAMENTO ESTATÍSTICO

1º Fase do ensaio de carga

- I DESLOCAMENTOS VERTICAIS,
ABERTURA DE JUNTA E ROTAÇÕES.
(sentido Régua – Pinhão)

- II DESLOCAMENTOS VERTICAIS,
ABERTURA DE JUNTA E ROTAÇÕES.
(sentido Pinhão – Régua)

5.1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS, ABERTURA DE JUNTA E ROTAÇÕES (sentido Régua – Pinhão)

Quadro A.1 – Deslocamentos verticais medidos pelos sensores DVT1M, DVT1J, DVT2M, DVT2J, DVT3M, DVT3J e Comparador [mm], abertura da junta medida por DHT1M e DHT1MJ [mm] e rotações [$\times 10^{-3}^\circ$].

		DVT1M	DVT1J	DVT2M	DVT2J	DVT3M	DVT3J	DHT1M	DHT1J	IT1M	Comp.
Vazio inicial	Médio	-0,85	-0,32	-0,39	-0,22	-0,72	0,03	-0,01	0,00	-0,25	-0,26
	Máximo	1,04	1,47	2,35	0,70	0,63	1,25	-0,01	0,00	-0,16	-0,20
	Mínimo	-2,81	-2,08	-3,06	-0,89	-2,05	-0,99	-0,01	0,00	-0,29	-0,30
	Desvio padrão	0,96	0,87	1,39	0,44	0,76	0,62	0,00	0,00	0,04	0,02
	Nº de amostras	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	149,00	61,00
3ºTramo	Médio	10,15	10,16	-0,06	-0,42	-0,53	-0,27	-0,02	-0,01	-	-
	Máximo	11,30	10,97	2,08	0,23	0,54	0,70	-0,01	-0,01	-	-
	Mínimo	9,70	6,76	-2,11	-0,99	-1,89	-1,36	-0,02	-0,01	-	-
	Desvio padrão	0,20	0,34	0,47	0,16	0,30	0,27	0,00	0,00	-	-
	Nº de amostras	120	120	120	120	120	120	120	120	-	-
2ºTramo	Médio	-2,12	-0,40	8,16	10,94	0,02	0,65	-0,06	-0,05	-	-
	Máximo	-1,37	0,44	10,25	11,48	0,50	1,10	-0,06	-0,05	-	-
	Mínimo	-3,23	-1,19	7,12	9,96	-0,77	0,09	-0,06	-0,05	-	-
	Desvio padrão	0,27	0,22	0,35	0,36	0,15	0,14	0,00	0,00	-	-
	Nº de amostras	120	120	120	120	120	120	120	120	-	-
1ºTramo	Médio	-2,47	-0,63	-2,98	0,88	11,24	12,26	-0,31	-0,29	-0,29	10,39
	Máximo	-2,27	-0,42	-2,61	1,22	11,48	12,71	-0,30	-0,29	-0,29	10,43
	Mínimo	-2,64	-0,83	-3,21	-0,06	10,93	11,39	-0,31	-0,30	-0,30	10,34
	Desvio padrão	0,08	0,07	0,11	0,14	0,12	0,20	0,00	0,00	0,00	0,02
	Nº de amostras	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Vazio final	Médio	-3,18	-0,99	-2,13	1,38	0,40	2,55	-0,09	-0,08	-0,08	-0,40
	Máximo	-2,99	-0,80	-1,96	1,52	0,56	2,73	-0,09	-0,08	-0,08	-0,31
	Mínimo	-3,40	-1,18	-2,28	1,25	0,27	2,41	-0,09	-0,08	-0,08	-0,43
	Desvio padrão	0,09	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,02
	Nº de amostras	60	60	60	60	60	60	60	60	59	19

5.2 DESLOCAMENTOS VERTICAIS, ABERTURA DE JUNTA E ROTAÇÕES (sentido Pinhão – Régua)

Quadro A.2 – Deslocamentos verticais medidos pelos sensores DVT1M, DVT1J, DVT2M, DVT2J, DVT3M, DVT3J e Comparador [mm], abertura da junta medida por DHT1M e DHT1MJ [mm].

		DVT1M	DVT1J	DVT2M	DVT2J	DVT3M	DVT3J	DHT1M	DHT1J	Comp.
Vazio inicial	Médio	-0,06	-0,13	0,09	0,05	0,04	0,02	-0,01	0,00	-0,02
	Máximo	0,13	0,07	0,26	0,19	0,21	0,19	-0,01	0,00	0,05
	Mínimo	-0,28	-0,31	-0,06	-0,08	-0,08	-0,13	-0,01	0,00	-0,56
	Desvio padrão	0,09	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,00	0,00	0,12
	Nº de amostras	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00	33,00	61,00	61,00
1ºTramo	Médio	-0,66	-0,24	0,34	0,25	10,79	11,66	-0,02	-0,26	10,50
	Máximo	-0,26	0,17	0,58	0,42	11,11	12,11	-0,01	-0,26	10,70
	Mínimo	-0,96	-0,50	-0,01	-0,08	9,70	11,18	-0,02	-0,27	9,84
	Desvio padrão	0,14	0,12	0,13	0,11	0,21	0,22	0,00	0,00	0,23
	Nº de amostras	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00	120	61,00	61
2ºTramo	Médio	-1,10	-0,15	11,42	11,64	-0,01	0,72	-0,06	-	-
	Máximo	-0,33	0,48	12,82	14,38	0,16	5,65	-0,06	-	-
	Mínimo	-1,64	-0,47	10,31	9,89	-0,16	-6,31	-0,06	-	-
	Desvio padrão	0,28	0,17	0,53	1,10	0,07	1,86	0,00	-	-
	Nº de amostras	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00	120	-	-
3ºTramo	Médio	9,75	10,68	0,48	0,47	-0,56	0,85	-0,31	-	-
	Máximo	10,05	10,97	0,98	0,68	-0,27	1,25	-0,30	-	-
	Mínimo	9,47	10,36	-0,11	0,28	-0,90	0,62	-0,31	-	-
	Desvio padrão	0,10	0,14	0,24	0,09	0,13	0,12	0,00	-	-
	Nº de amostras	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00	61,00	120	-	-
Vazio final	Médio	-2,10	-0,19	-0,75	-0,05	-0,79	0,69	-0,09	-0,03	-0,42
	Máximo	-1,47	0,62	-0,04	1,87	-0,27	5,38	-0,09	-0,03	-0,38
	Mínimo	-2,46	-0,68	-1,34	-1,57	-1,20	-3,70	-0,09	-0,03	-0,46
	Desvio padrão	0,18	0,19	0,24	0,43	0,13	0,88	0,00	0,00	0,02
	Nº de amostras	121,00	121,00	121,00	121,00	121,00	121,00	60	121,00	60

ANEXO B

RESULTADOS COMPLEMENTARES DA MEDIÇÃO: TRATAMENTO ESTATÍSTICO

2º Fase do ensaio de carga

- I DEFORMAÇÕES NA CORDA INFERIOR
- II DEFORMAÇÕES NA CORDA SUPERIOR
- III DEFORMAÇÕES EM DIAGONAIS
- IV DEFORMAÇÕES EM MONTANTES
- V DEFORMAÇÕES EM CARLINGAS
- VI DEFORMAÇÕES EM LONGARINAS
- VII ROTAÇÕES

I DEFORMAÇÕES NA CORDA INFERIOR

Quadro B.1 – Deformações nas secções S1, S2 e S3 [$\times 10^{-6}$ m/m].

		S1		S2		S3	
		ET-I1 (J/J)	ET-I2 (J/M)	ET-I3 (M/J)	ET-I4 (M/M)	ET-I5 (J/J)	ET-I6 (J/M)
Vazio inicial	Médio	0,2469693	0,4143137	1,1456037	0,3814482	-0,6017965	-0,5122412
	Máximo	2,07529	2,77017	3,9272	3,05047	1,41139	1,23546
	Mínimo	-0,68482	-0,50158	0	-0,74851	-2,32767	-1,61383
	Desvio padrão	0,4876783	0,5103003	0,6011348	0,5535516	0,7855589	0,4532432
	Nº de amostras	89	89	89	89	89	89
1ºTramo	Médio	-0,7188379	-0,3198917	1,6230086	0,2067584	-1,2958701	-1,1430312
	Máximo	0,31636	0,32428	2,21203	0,77674	1,41043	-0,2310306
	Mínimo	-1,27963	-0,84199	0,95571	-0,45763	-3,47777	-2,12355
	Desvio padrão	0,3092609	0,2285068	0,2680014	0,227795	1,089947	0,3279602
	Nº de amostras	119	119	119	119	119	119
2ºTramo	Médio	-1,7815044	-1,2336399	1,1515208	-1,4521556	24,277509	22,725286
	Máximo	-0,74318	-0,41454	2,13701	-0,27553	25,27955	23,53318
	Mínimo	-2,64459	-1,98707	0,35713	-2,33807	23,34269	21,8729
	Desvio padrão	0,3500858	0,2846843	0,3171993	0,4100575	0,3948214	0,3264054
	Nº de amostras	118	118	118	118	118	118
3ºTramo	Médio	24,155625	28,102633	27,860038	28,132846	0,7792598	-0,8301703
	Máximo	25,03782	28,66964	28,43344	29,45586	1,846	-0,23484
	Mínimo	23,36831	27,4834	27,01718	26,81433	-0,92077	-1,79608
	Desvio padrão	0,2992697	0,2428528	0,274225	0,6827092	0,6068819	0,3121695
	Nº de amostras	117	117	117	117	117	117
Vazio final	Médio	-0,2147952	1,1592644	3,6248894	0,5377861	3,9498048	0,3886067
	Máximo	13,20593	14,76903	15,78269	13,84746	17,59812	12,42142
	Mínimo	-2,2711	-1,09498	1,77232	-1,52285	2,23368	-1,22441
	Desvio padrão	1,8452636	2,0874815	1,6967764	1,9401583	1,9295081	1,8414236
	Nº de amostras	116	116	116	116	116	116

I DEFORMAÇÕES NA CORDA INFERIOR

Quadro B.2 – Deformações nas secções S4, S9 e S10 [$\times 10^{-6}$ m/m].

		S4		S9		S10	
		ET-I7 (M/J)	ET-I8 (M/M)	ET-I11 (J/J)	ET-I12 (J/M)	ET-I15 (M/J)	ET-I16 (M/M)
Vazio inicial	Médio	-0,6265725	-0,3425721	-0,2663647	-3,1928987	0,7760269	0
	Máximo	1,89187	2,01487	2,21862	1,7807	3,88489	0
	Mínimo	-1,73742	-1,13955	-3,00341	-6,91109	-1,84733	0
	Desvio padrão	0,5667265	0,5129954	0,9897455	1,9046551	1,0635265	0
	Nº de amostras	89	89	89	89	89	89
1ºTramo	Médio	-1,404605	-1,3240769	27,88299	12,562247	25,891647	0
	Máximo	-0,56767	-0,3683543	30,42867	19,34287	28,76006	0
	Mínimo	-2,27387	-2,30789	25,23544	7,53362	22,96791	0
	Desvio padrão	0,3713538	0,3669135	0,9717654	2,6137994	1,0983279	0
	Nº de amostras	119	119	119	119	119	119
2ºTramo	Médio	26,356191	24,484219	0,0045543	-27,01381	1,3671197	0
	Máximo	27,48578	25,36476	1,96371	-20,9566	3,9959	0
	Mínimo	25,60698	23,79619	-2,47948	-33,66788	-1,75211	0
	Desvio padrão	0,3710882	0,3356852	0,8332494	2,206426	0,9567912	0
	Nº de amostras	118	118	118	118	118	118
3ºTramo	Médio	-0,5687588	-1,2369276	0,0183322	-36,908433	1,5864636	0
	Máximo	0,26335	-0,58509	2,04427	-31,62213	4,07724	0
	Mínimo	-1,68762	-2,61313	-2,69979	-42,41128	-1,0172	0
	Desvio padrão	0,3408011	0,3254383	0,7562581	2,3341098	0,8926727	0
	Nº de amostras	117	117	117	117	117	117
Vazio final	Médio	0,4054161	-0,5807381	0,9489947	-45,074321	2,2675266	0
	Máximo	12,58787	11,63008	18,40598	-28,72663	15,62696	0
	Mínimo	-1,41491	-2,07187	-3,03415	-53,3512	-1,97156	0
	Desvio padrão	1,9069946	1,744011	2,446762	3,5815651	2,1134968	0
	Nº de amostras	116	116	116	116	116	116

II DEFORMAÇÕES NA CORDA SUPERIOR

Quadro B.3 – Deformações nas secções S7 e S8 [$\times 10^{-6}$ m/m].

		S7		S8	
		ET-S9 (J/J)	ET-S10 (J/M)	ET-S13 (M/J)	ET-S14 (M/M)
Vazio inicial	Médio	-0,5803318	-0,7043689	0,1522562	-0,3756205
	Máximo	3,24655	3,02142	5,05403	3,65821
	Mínimo	-4,16923	-4,61265	-4,5109	-5,05687
	Desvio padrão	1,488109	1,5205701	1,6546148	1,5595618
	Nº de amostras	89	89	89	89
1ºTramo	Médio	-41,05524	-44,06025	-41,787902	-44,546072
	Máximo	-36,87292	-39,90035	-37,40031	-40,5394
	Mínimo	-45,20385	-48,09671	-45,85304	-47,98622
	Desvio padrão	1,4255331	1,4433776	1,5404242	1,3814729
	Nº de amostras	119	119	119	119
2ºTramo	Médio	0,6690852	0,4279712	1,6906974	0,8883223
	Máximo	3,68596	3,47633	5,68456	4,1052
	Mínimo	-4,16586	-4,47229	-3,20755	-3,27731
	Desvio padrão	1,2930265	1,3035917	1,3750068	1,2143628
	Nº de amostras	118	118	118	118
3ºTramo	Médio	1,3091827	1,0882494	2,2920281	1,3947974
	Máximo	4,90716	4,73833	6,25332	4,60206
	Mínimo	-2,77605	-3,22059	-1,72038	-2,02787
	Desvio padrão	1,1305945	1,1407757	1,2642073	1,1246947
	Nº de amostras	117	117	117	117
Vazio final	Médio	0,4581521	0,0563966	1,0370985	0,2396485
	Máximo	5,61523	5,42462	6,88068	5,54033
	Mínimo	-23,06946	-25,65024	-18,5742	-19,49176
	Desvio padrão	4,0515424	4,3365826	3,6250985	3,7018325
	Nº de amostras	116	116	116	116

III DEFORMAÇÕES EM DIAGONAIS

Quadro B.4 – Deformações nas secções S5, S14 e S16 [$\times 10^{-6}$ m/m].

		S5		S14		S16	
		ET-D1 (M/J)	ET-D2 (M/M)	ET-D3 (M/J)	ET-D4 (M/M)	ET-D5 (M/J)	ET-D6 (M/M)
Vazio inicial	Médio	1,9228593	0,8501841	0,167839	0,3698649	0,2151464	0,4699231
	Máximo	16,7557	12,8473	6,0604	5,99363	4,0152	5,80469
	Mínimo	-13,1444	-11,32013	-6,0579	-5,87549	-3,96686	-5,19767
	Desvio padrão	5,5495512	4,652811	2,3575828	2,277414	1,5077723	2,0044875
	Nº de amostras	89	89	89	89	89	89
1ºTramo	Médio	25,392816	24,522687	22,980522	21,037737	14,733547	15,770276
	Máximo	46,35517	41,9988	29,51988	27,54487	20,51901	23,35771
	Mínimo	9,29747	10,61673	14,19989	12,36081	10,2724	10,18644
	Desvio padrão	5,9865967	5,0523108	2,449615	2,4355956	1,5469847	2,089275
	Nº de amostras	119	119	119	119	119	119
2ºTramo	Médio	3,3403026	3,4084972	-0,1285264	0,4821135	-0,0762467	0,3590939
	Máximo	19,62221	16,65946	7,43179	8,03786	4,2319	6,25452
	Mínimo	-18,00419	-13,56676	-7,18805	-6,53286	-5,82772	-6,85964
	Desvio padrão	5,8869073	4,8570818	2,3199143	2,3254552	1,5134351	2,0501302
	Nº de amostras	118	118	118	118	118	118
3ºTramo	Médio	4,9100768	5,0064013	-0,2939315	0,406028	0,2331992	0,7600657
	Máximo	22,77953	19,05856	6,76839	7,70044	4,63647	6,78792
	Mínimo	-15,30094	-11,52856	-6,5732	-5,81917	-4,8398	-6,09272
	Desvio padrão	5,0366549	4,1475028	2,0004042	1,9990152	1,3031463	1,7582633
	Nº de amostras	117	117	117	117	117	117
Vazio final	Médio	6,6323316	6,910593	0,9515298	1,6507774	1,1458027	1,6519647
	Máximo	23,77372	21,28186	17,04289	13,82083	12,11473	10,57005
	Mínimo	-14,11815	-10,22975	-6,48763	-5,63155	-4,70561	-5,88076
	Desvio padrão	5,9885958	5,057796	3,4318667	3,0219002	2,2892072	2,6287771
	Nº de amostras	116	116	116	116	116	116

IV DEFORMAÇÕES EM MONTANTES

Quadro B.5 – Deformações nas secções S13 e S15 [$\times 10^{-6}$ m/m].

		S13		S15	
		ET-M1 (M/J)	ET-M2 (M/M)	ET-M3 (M/J)	ET-M4 (M/M)
Vazio inicial	Médio	0,4927799	-0,111235	0,05081	0,0869647
	Máximo	11,6988	4,46248	2,80251	4,61373
	Mínimo	-10,95948	-3,80171	-2,82851	-4,36546
	Desvio padrão	4,4041083	1,7378238	1,0454814	1,6028757
	Nº de amostras	89	89	89	89
1ºTramo	Médio	11,032665	5,8136142	-18,64296	-8,628525
	Máximo	27,79828	12,25243	-16,07549	-4,27762
	Mínimo	-2,26963	0,64344	-21,71342	-14,3858
	Desvio padrão	4,7552642	1,8575518	0,9176541	1,6779692
	Nº de amostras	119	119	119	119
2ºTramo	Médio	0,4737219	0,1661934	-0,2000344	0,5279725
	Máximo	13,49381	4,86865	2,50431	5,72103
	Mínimo	-16,12164	-5,86427	-2,6885	-4,15164
	Desvio padrão	4,6149744	1,7201417	0,8813414	1,6490771
	Nº de amostras	118	118	118	118
3ºTramo	Médio	1,0855856	0,6149475	-0,2580262	0,6322954
	Máximo	14,37768	5,34615	2,30834	5,9187
	Mínimo	-14,26474	-5,34911	-2,8325	-4,04823
	Desvio padrão	3,958431	1,5158401	0,763493	1,3990002
	Nº de amostras	117	117	117	117
Vazio final	Médio	1,9802218	1,9057989	0,161042	0,964872
	Máximo	14,79394	14,86048	11,31093	6,85693
	Mínimo	-14,37244	-4,75481	-10,15899	-3,49621
	Desvio padrão	4,901174	2,5986032	2,4009486	1,9233751
	Nº de amostras	116	116	116	116

V DEFORMAÇÕES EM CARLINGAS E LONGARINA

Quadro B.6 – Deformações nas secções S11, S12 e S6 [$\times 10^{-6}$ m/m].

		S11		S12		S6	
		ET-C1 (–/S-D)	ET-C2 (–/N-S)	ET-C3 (–/S-S)	ET-C4 (–/N-D)	ET-L1 (C/J-D)	ET-L2 (C/M-S)
Vazio inicial	Médio	-0,1199695	0,4086293	-0,2351761	-0,4788641	-0,188704	1,063E-12
	Máximo	4,32078	2,07338	1,48825	3,00231	4,38214	9,459E-11
	Mínimo	-1,26683	-1,2607	-1,25768	-3,04987	-2,80871	0
	Desvio padrão	0,8356699	0,6533531	0,468402	1,2872952	1,3058547	1,003E-11
	Nº de amostras	89	89	89	89	89	89
1ºTramo	Médio	24,446427	0,9063076	1,3798742	-7,6283824	4,3828418	0
	Máximo	25,56058	3,16113	2,58789	-2,88025	8,67269	0
	Mínimo	23,49423	-1,23055	0,00162	-11,85002	0,64696	0
	Desvio padrão	0,3845372	0,7396583	0,4761798	1,4959461	1,3654434	0
	Nº de amostras	119	119	119	119	119	119
2ºTramo	Médio	-0,2863743	2,1179607	0,0804964	-4,467688	-0,8156474	0
	Máximo	0,5085	3,718	1,21188	-0,3479	2,98216	0
	Mínimo	-0,89429	-0,55125	-0,91411	-8,79936	-4,67757	0
	Desvio padrão	0,3137559	0,6850739	0,3988364	1,2951598	1,1784417	0
	Nº de amostras	118	118	118	118	118	118
3ºTramo	Médio	0,0218516	2,6259717	0,3378174	-4,9023019	1,0119582	8,084E-13
	Máximo	0,88839	4,22847	1,09993	-1,33686	2,13936	9,459E-11
	Mínimo	-0,66393	0,7011	-0,61355	-9,14184	-4,75516	0
	Desvio padrão	0,3390216	0,6420611	0,3143977	1,1233393	1,0207708	8,745E-12
	Nº de amostras	117	117	117	117	117	117
Vazio final	Médio	0,7072128	2,8119011	0,7019057	-5,3631276	-0,6728039	0
	Máximo	34,47778	4,73525	7,94473	-1,58515	18,40371	0
	Mínimo	-1,11393	0,32379	-4,17028	-11,00177	-5,25148	0
	Desvio padrão	3,3570848	0,7104292	1,2039551	1,4238238	2,2723961	0
	Nº de amostras	116	116	116	116	116	116

VI ROTAÇÕES

Quadro B.7 – rotações [$\times 10^{-3}$].

		IT-I1 (M)	IT-E1 (M)
Vazio inicial	Médio	-0,0005837	0,0002117
	Máximo	0,00181	0,0020063
	Mínimo	-0,00374	-0,0011238
	Desvio padrão	0,0009436	0,000547
	Nº de amostras	89	89
1ºTramo	Médio	0,0045666	0,0166291
	Máximo	0,0088963	0,017205
	Mínimo	0,0006862	0,0158525
	Desvio padrão	0,001101	0,0002424
	Nº de amostras	119	119
2ºTramo	Médio	-0,0005107	0,0004754
	Máximo	0,0007113	0,0025025
	Mínimo	-0,0019237	-0,001325
	Desvio padrão	0,0005449	0,0004818
	Nº de amostras	118	118
3ºTramo	Médio	-0,0004619	0,0003294
	Máximo	0,0005613	0,0021287
	Mínimo	-0,001905	-0,0005675
	Desvio padrão	0,0004776	0,0004351
	Nº de amostras	117	117
Vazio final	Médio	-0,0001762	0,0007281
	Máximo	0,011065	0,0097637
	Mínimo	-0,0026525	-0,0017363
	Desvio padrão	0,0014863	0,0017048
	Nº de amostras	116	116