

Monitorização do comportamento estrutural de pontes de betão

Caso de estudo: Ponte de São João das Areias

Maria Francisca Beirão do Carmo Abreu

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador:

Prof. Doutor António José da Silva Costa

Júri

Presidente: Prof. Doutor António Manuel Figueiredo Pinto da Costa

Orientador: Prof. Doutor António José da Silva Costa

Vogal: Prof. Doutor Rui Vaz Rodrigues

Outubro de 2017

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Prof António Costa por ter aceite ser meu orientador na elaboração desta dissertação, e pela dedicação e ajuda essenciais ao desenvolvimento do trabalho.

Queria deixar o maior dos agradecimentos aos meus pais pelo apoio e dedicação ao longo de todos estes anos, por terem possibilitado a minha formação académica e principalmente por acreditarem nas minhas capacidades, as quais espero não ter desiludido.

Não posso deixar de mencionar os meus irmãos e família, que estiveram sempre comigo, nos bons e, principalmente, nos maus momentos ao longo destes anos e durante todo o meu percurso académico. Os conselhos e incentivos foram motivadores e importantes e tiveram um papel crucial na pessoa em que me tornei.

Aos meus amigos por serem os melhores que poderia ter, acompanharam-me, apoiaram-me, ouviram-me e perceberam quando a minha disponibilidade podia não ser a total.

Aos meus colegas com quem partilhei inúmeros conhecimentos e momentos que pretendo guardar comigo.

A todos um muitíssimo obrigado!!

Resumo

A observação e monitorização de estruturas como pontes fornecem informação essencial para o controle e avaliação da integridade estrutural de obras de arte, principalmente quando estas apresentam deterioração ou deficiências estruturais. A medição, a tempo real e contínuo, de grandezas estruturais relevantes permite um acompanhamento permanente da evolução do comportamento da estrutura.

Nesta dissertação apresenta-se a monitorização levada a cabo na Ponte de São João das Areias. Esta estrutura foi monitorizada durante as obras de requalificação e substituição das fundações e pilares da ponte por apresentarem deterioração devido a reações expansivas alcalis-sílica.

O sistema prevê a medição contínua, não só de grandezas como as rotações no topo dos pilares e os deslocamentos de juntas, como também as temperaturas ambiente e nos materiais. Com a apresentação e discussão das leituras de cerca de um ano de observação procede-se à calibração de um modelo numérico. Este modelo serve como uma essencial ferramenta para a avaliação do comportamento da estrutura, na medida em que permite prever a sua resposta perante eventuais cenários de dano.

O sistema de monitorização compreende um modelo matemático capaz de gerar uma série de estimativas para as diversas grandezas estruturais, através da compensação das grandezas ambientais. Este modelo permite o controlo de eventuais desvios no comportamento da ponte daquilo que se aponta como previsível, servindo também como base para a definição de níveis de alerta associados a limites de dano. Finalmente, por aplicação no modelo numérico, será estudado o significado da imposição destes limites na integridade da estrutura.

Palavras-chave: monitorização estrutural; tipos de sensores; níveis de alerta; efeitos da deterioração; simulação numérica

Abstract

Structural observation and monitoring provide us fundamental information for the control and evaluation of the structural integrity, particularly when structures present severe deterioration states. The continuous measurement of relevant structural entities allows following up of structural behavior.

The present dissertation presents the structural health monitoring carried out on the São João das Areias bridge. This bridge was monitored during the foundations and pillars rehabilitation works, that has shown some structural problems related to alkali-silica expansive reactions.

The present structural health monitoring system is based on the continuous monitoring, not only of entities like rotations on top of all the pillars and of joint displacements, but also some selected temperatures. The main results achieved during a period of a year of the ongoing monitoring were used for the numerical model calibration. This model, when well calibrated, was the essential tool for simulate the possible structural anomalies that might occur on the bridge and evaluate all the effects in the structure.

The monitoring system installed included the development of a statistic model that can predict the structure behavior through the correction of environmental effects. In this way, it was possible not only to control deviations from the predictable behavior but also to estimate alert states associated with damage limits. The numerical model allowed the study of the alert levels in the integrity of the different instrumented sections.

Keywords: structural monitoring; different type of sensors; alert states; deterioration effects, numerical models

Índice Geral

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento e objetivos da dissertação	1
1.2	Organização da dissertação.....	2
2.	Sistemas de Monitorização Estrutural	5
2.1	Considerações iniciais.....	5
2.2	Constituição dos sistemas de Monitorização	6
2.2.1	Rede de Sensores.....	7
2.2.2	Sistemas de aquisição.....	8
2.2.3	Sistema de transmissão de dados	11
2.2.4	Processamento e Tratamento de dados	11
2.2.5	Avaliação do Comportamento da Estrutura	12
2.3	Grandezas de medição e tipos de sensores	13
2.3.1	Sensores de base elétrica.....	13
2.3.2	Sensores em fibra ótica.....	21
2.3.3	Sensores sem fios	23
2.4	Considerações finais	24
3.	A Ponte de São João das Areias	27
3.1	Considerações iniciais.....	27
3.2	Descrição Geral da Obra.....	28
3.2.1	Materiais	30
3.3	Observação estrutural da Ponte de São João das Areias	31
3.3.1	Inspeções visuais, principais anomalias e intervenções.....	31
3.3.2	Sistema de Monitorização	33
3.3.3	Resultados da Monitorização	38

3.4	Considerações Finais	43
4.	O Comportamento estrutural da Ponte de São João das Areias.....	45
4.1	Considerações iniciais.....	45
4.2	Discussão de resultados	46
4.2.1	Variação sazonal	46
4.2.2	Variações diárias	50
4.3	Modelação numérica da Ponte de São João das Areias	57
4.3.1	Breve descrição do modelo.....	57
4.3.2	Considerações sobre o modelo.....	59
4.3.3	Discussão de resultados obtidos e validação do modelo	62
4.4	Análise de eventuais cenários de dano.....	67
4.4.1	Sistema de vigilância e limites de alerta implementados.....	68
4.4.2	Implicações dos limites de alerta a nível estrutural.....	70
4.5	Considerações Finais	75
5.	Conclusão	77
5.1	Considerações finais	77
5.2	Desenvolvimentos Futuros.....	78
6.	Bibliografia.....	81

Índice de Figuras

Figura 2.1: Composição de um sistema de Monitorização (Adaptado de Bisby, 2004)	7
Figura 2.2: Sistema de Aquisição DT800 da Data Taker.....	10
Figura 2.3: Sistema de Aquisição si325 da Micron Optic	10
Figura 2.4: Esquema de Funcionamento de um transdutor capacitivo (a) e Comparador digital de deslocamento (b) (Assis, 2007).....	15
Figura 2.5: Princípio de funcionamento de um transdutor resistivo	15
Figura 2.6: Exemplo de um transdutor resistivo da SLB Automação	16
Figura 2.7: Estrutura básica de um LVDT (Adaptado de Figueiredo, 2006).....	16
Figura 2.8: Transdutores indutivos de deslocamento, LVDT's (RDP)	17
Figura 2.9: Inclínometro uniaxial da série LSOC, Jewell Instruments.....	18
Figura 2.10: Termopar da série CS do Grupo ECIL.....	19
Figura 2.11: Elemento sensor (a) e sensor protegido para aplicação em obra (b). Fonte: Grupo ECIL.....	21
Figura 2.12: Estrutura de uma fibra ótica (Adaptado de Bisby, 2005)	22
Figura 2.13: Princípio de funcionamento de uma fibra ótica (Félix, 2004)	22
Figura 2.14: Diferentes configurações de uma rede sem fios, (Faria, 2010).....	24
Figura 3.1: Planta (a), alçado (b) e fotografia da obra (c) da ponte de São João das Areias	28
Figura 3.2: Secções Transversais a 1/3 do vão (a) e sobre os apoios (b)	29
Figura 3.3: Perfil transversal dos pilares e embasamentos	30
Figura 3.4: Esquema (a) e fotografia (b) da fendilhação no fuste do pilar	32
Figura 3.5: Pormenores da malha de fissuras verificada numa das faces de um pilar [esquerda] e de uma fissura com abertura de 3mm [direita].....	32
Figura 3.6: Caixas de derivação de termómetros	34
Figura 3.7: Inclínometro uniaxial do tipo LSOC-1-C.....	35
Figura 3.8: Convenção de sinais adotada para as rotações no topo dos pilares	35

Figura 3.9: LVDT do tipo DCRH2000C/371	36
Figura 3.10: Termómetro do tipo PT100	36
Figura 3.11: Localização esquemática das secções instrumentadas	37
Figura 3.12: Posto de observação	38
Figura 3.13: Temperatura ambiente	39
Figura 3.14: Temperatura no tabuleiro	40
Figura 3.15: Temperatura no pilar P3	40
Figura 3.16: Temperatura junto ao inclinómetro instalado em P3	40
Figura 3.17: Deslocamentos das juntas de dilatação	41
Figura 3.18: Rotações pilar P1	41
Figura 3.19: Rotações pilar P2	42
Figura 3.20: Rotações pilar P3	42
Figura 3.21: Rotações pilar P4	42
Figura 3.22: Rotações pilar P5	43
Figura 3.23: Rotações pilar P6	43
Figura 4.1: Convenção de sinais para a rotação no topo dos pilares	47
Figura 4.2: Temperatura média no tabuleiro	47
Figura 4.3: Temperatura média no pilar	48
Figura 4.4: Deslocamentos na junta da esquerda	48
Figura 4.5: Deslocamentos na junta da direita	49
Figura 4.6: Rotações Longitudinais no pilar P2	49
Figura 4.7: Rotações Longitudinais no pilar P5	50
Figura 4.8: Temperatura média ambiente, no tabuleiro (tramo T4) e pilar (pilar P3)	51
Figura 4.9: Posição dos sensores no tabuleiro, tramo T4	52
Figura 4.10: Leituras dos sensores instalados no tabuleiro, tramo T4	52
Figura 4.11: Posição dos sensores no pilar P3	53
Figura 4.12: Leituras dos sensores instalados no pilar P3	53
Figura 4.13: Deslocamentos na junta de dilatação do encontro esquerdo e temperatura média no tabuleiro	54
Figura 4.14: Deslocamentos na junta de dilatação do encontro direito e temperatura média no tabuleiro	54

Figura 4.15: Rotações Longitudinais no pilar P2	55
Figura 4.16: Rotações Longitudinais no pilar P5	56
Figura 4.17: Rotações transversais no pilar P2	56
Figura 4.18: Rotações transversais no pilar P5	57
Figura 4.19: Modelo numérico da Ponte de São João das Areias.....	58
Figura 4.20: Discretização em troços das diferentes secções transversais do tabuleiro adotada no modelo	58
Figura 4.21: Modelos numéricos do pilar com recurso a elementos do tipo casca (Modelo 1) e elementos do tipo barra (Modelo 2)	60
Figura 4.22: Deformada, em planta, do Modelo para uma variação uniforme de temperatura de +12,5°C	62
Figura 4.23: Deformada, em alçado, do Modelo para uma variação uniforme de temperatura de +12,5°C	62
Figura 4.24: Deformada do modelo, com os pilares P1 e P6 fixos, para uma variação uniforme de temperatura de 6°C no tabuleiro	63
Figura 4.25: Deformada da estrutura para a aplicação de gradientes térmicos nos pilares	64
Figura 4.26: Deformada, em planta, do Modelo para uma variação diferencial de temperatura no tabuleiro	65
Figura 4.27: Deformada de um pilar, obtida através de um corte no tabuleiro.....	66
Figura 4.28: Deformada da estrutura para a uma rotação imposta unitária na base do pilar P168	
Figura 4.29: Deformada da estrutura para uma rotação imposta unitária na base do pilar P2..	68
Figura 4.30: Resíduo entre a rotação longitudinal medida e estimada para o pilar P2	69
Figura 4.31: Resíduo entre a rotação longitudinal medida e estimada para o pilar P5	69
Figura 4.32: Discretização do pilar da ponte.....	71
Figura 4.33: Diagrama de interação N-M e representação do par de esforços nos pilares da ponte	73
Figura 4.34: Diagrama de interação N-M e representação do par de esforços nos pilares fixos da ponte.....	75

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Principais características técnicas do transdutor resistivo da SLB Automação	16
Tabela 2.2: Principais características técnicas dos LVDT's fornecidos pela MRA do Grupo Álava	17
Tabela 2.3: Principais características técnicas do inclinómetro uniaxial LSOC-1 da Jewell Instruments	18
Tabela 2.4: Comparação entre diferentes tipos de termopares (Fonte: Grupo ECIL)	20
Tabela 2.5: Características técnicas do sensor PT100 do Grupo ECIL	21
Tabela 3.1: Alturas dos pilares	29
Tabela 3.2: Especificações dos Materiais	30
Tabela 3.3: Descrição da instrumentação aplicada	37
Tabela 4.1: Propriedades das secções transversais do tabuleiro adotadas no modelo	58
Tabela 4.2: Propriedades da secção dos pilares e embasamentos	59
Tabela 4.3: Comparação das rotações nos dois modelos	60
Tabela 4.4: Determinação da força de atrito e reações horizontais nos pilares P1 e P6	61
Tabela 4.5: Comparação de valores reais e valores obtidos no modelo para os deslocamentos nas juntas e rotações longitudinais nos pilares P2 e P5, para uma variação uniforme de temperatura de +12,5°C	63
Tabela 4.6: Valores obtidos no modelo para uma variação uniforme de temperatura no tabuleiro	64
Tabela 4.7: Valores obtidos no modelo para aplicação de gradientes térmicos nos pilares	64
Tabela 4.8: Comparação de resultados reais com os obtidos no modelo	65
Tabela 4.9: Valores obtidos no modelo para uma variação diferencial de temperatura no tabuleiro	66
Tabela 4.10: Comparação de resultados reais com os obtidos no modelo	67
Tabela 4.11: Esforços na base do pilar P2 para o alerta amarelo	71
Tabela 4.12: Momentos nos pontos de discretização do pilar da ponte	72

Tabela 4.13: Pares de esforços gerados nos pilares da ponte devido a uma rotação imposta no pilar P2 de alerta amarelo	73
Tabela 4.14: Esforços no pilar P2 para o alerta vermelho	74
Tabela 4.15: Pares de esforços nos pilares fixos da ponte devido a uma rotação imposta no pilar P2 de alerta vermelho	74

Lista de abreviaturas e símbolos

μm	micrómetros
mm	milímetros
m	metros
s	sensibilidade
E	Esquerda
D	Direita
M	Montante
J	Jusante
L	Laje
V	Vigas
T	Tramo do tabuleiro
P	Pilar
RO_Lo	Rotações Longitudinais
RO_Tr	Rotações Transversais
DJ	Deslocamento de Junta
ST	Sensor de Temperatura
Θ	rotação
δ	deslocamento
ΔX	variação da grandeza X
ΔY	variação da grandeza Y
x_{cri}	centro de rigidez
k_i	Rigidez do elemento

x_i	Posição do elemento
°	graus
°C	graus Celsius
mA	miliamperes
DC	direct corrent
f.e.m	força electromotriz
f_{cd}	valor de cálculo da resistência do betão à compressão
f_{ck}	valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade em cilindros
f_{ctm}	valor da tensão media de rotura do betão à tração
f_{yk}	valor característico da tensão de cedência das armaduras
f_{yd}	valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras
$E_{c,28}$	módulo de elasticidade tangente na origem, para um betão de massa volúmica normal aos 28 dias de idade
E_s	valor de cálculo do módulo de elasticidade do aço de uma armadura para betão armado
CSV	Comma Separated Values
SHM	Structural Health Monitoring
DAS	Data Acquisition System
A/D	Analógico-Digital
USB	Universal Serial Bus
LVDT	Linear Variable Differential Transformer

1. Introdução

1.1 Enquadramento e objetivos da dissertação

Os desafios colocados hoje aos projetistas, aos construtores e às entidades responsáveis pela exploração das obras de engenharia civil, e em particular das de maior dimensão, associados aos recentes desenvolvimentos tecnológicos, impõem uma nova abordagem aos sistemas de gestão de obras de arte. Recorrendo a sistemas de monitorização da integridade estrutural, que assentam na instalação de sensores ligados a equipamentos automáticos de aquisição e de transmissão de sinal, é possível controlar, em permanência, o estado de conservação e de segurança da estrutura.

Neste contexto, apresenta-se no presente trabalho um caso de estudo relativo à monitorização levada a cabo na ponte de São João das Areias. Esta obra, situada na região centro de Portugal Continental foi construída na década de 1970 e tem vindo a apresentar uma crescente deterioração devida à progressão de reações expansivas álcalis-silica. Esta problemática afeta, essencialmente, o betão na base dos pilares e foi a principal responsável pelas obras de requalificação e substituição que ainda se encontram em curso.

Com uma evidente possibilidade de os danos associados à deterioração do betão conduzirem a um estado crítico de conservação da ponte, a atenção sobre eventuais alterações na resposta estrutural da ponte tem vindo a ser monitorizada. É com recurso a um modelo estatístico de interpretação das leituras dos parâmetros de resposta da estrutura que, para o caso da ponte de São João das Areias, se conseguiu estudar eventuais desvios do que seria o comportamento previsível da ponte.

A adoção de limites de alerta merece destaque por constituir uma forma de aviso, por parte do sistema de monitorização, de que o comportamento real da estrutura, medido por meio dos sensores, está a desviar-se da sua evolução normal.

No sentido de auxiliar, não só o estudo do comportamento da estrutura, como também a possibilidade de determinar as consequências de eventuais danos, recorre-se a um modelo de elementos finitos da ponte, implementado através de um programa de cálculo automático. Para que este modelo seja capaz de fornecer informações fiáveis sobre o comportamento da estrutura é necessário ser devidamente calibrado e validado de modo a simular o comportamento real da

obra. Processo este, conseguido através das leituras efetuadas pelos sensores instalados em obra.

A definição de modelos que representem o comportamento real da estrutura, seja em condições de serviço seja em situações mais imprevisíveis, deverá ser capaz de prever a resposta da estrutura a danos provocados pela deterioração com uma avaliação fiável das suas consequências na globalidade da mesma.

1.2 Organização da dissertação

No sentido de cumprir os objetivos propostos, a presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro, correspondente ao presente, prende-se com o enquadramento da dissertação focando-se nos principais objetivos do trabalho e organização do mesmo.

O segundo capítulo diz respeito à revisão da literatura no que concerne ao significado e descrição de um sistema de monitorização para avaliação da integridade estrutural. Serão discutidos os diversos componentes do sistema, passando pela rede de sensores, sistema de aquisição, transmissão, processamento e tratamento de dados até à própria avaliação do comportamento da estrutura. Este capítulo foca-se, ainda, na descrição dos diversos sensores de base elétrica disponíveis no mercado e salientam-se algumas inovações na tecnologia destes equipamentos, nomeadamente, tecnologias wireless e fibra ótica.

O terceiro capítulo aparece como o primeiro capítulo referente ao caso de estudo que motivou este trabalho. Dedicar-se à descrição geral da ponte de São João das Areias e as anomalias patentes que motivaram a instrumentalização da mesma. O sistema de monitorização instalado será discutido, bem como se apresentarão, de uma forma geral, os resultados obtidos durante um ano de observação. Ano este, compreendido entre Maio de 2016 e Maio de 2017.

O capítulo seguinte, capítulo quatro, compreende a essência do trabalho proposto. Neste serão discutidas, mais detalhadamente, as variações nas leituras das diferentes grandezas. Serão distinguidas duas análises, uma primeira que compreende as variações sazonais, onde serão discutidas as evoluções dos deslocamentos de juntas e das rotações nos topos dos pilares, ao longo do ano, e a sua relação com as variações de temperatura medidas na estrutura. Já a segunda análise compreende uma avaliação sobre as flutuações diárias das grandezas. Neste ponto escolheram-se as leituras feitas no dia 23 de Janeiro de 2017. Estes resultados servem como objeto de calibração do modelo numérico.

Ainda neste ponto do trabalho, serão apresentados os processos de vigilância e alerta implementados na monitorização, como tentativa de estudar a evolução do comportamento da estrutura. Serão discutidos eventuais cenários de dano e suas consequências, com recurso ao modelo numérico calibrado.

Finalmente, o último capítulo prende-se com algumas considerações sobre todo o trabalho, a título de conclusão, e serão feitas sugestões que poderão merecer um estudo mais detalhado no futuro.

2. Sistemas de Monitorização Estrutural

2.1 Considerações iniciais

A observação e análise do comportamento estrutural assumem grande importância nas obras de maior dimensão, em estruturas mais complexas e, em especial, quando a ocorrência de danos se traduzam em prejuízos severos para a sua manutenção em serviço ou para a segurança de quem as utiliza.

Neste sentido, a monitorização de estruturas é uma excelente ferramenta, na medida em que permite acompanhar o seu comportamento, quer durante situações de exploração normal, quer em situações de acidente.

Uma monitorização contínua de uma estrutura durante um período de tempo suficientemente longo pode servir como base ao estudo do comportamento real das estruturas, fornecendo informações que permitem avaliar a eficiência de soluções estruturais adotadas, quer em termos de gestão de pontes existentes, quer em projetos futuros (Farhey, 2005).

Por outro lado, em estruturas sujeitas a intervenções de reparação, reabilitação ou reforço, a aplicação de um sistema de monitorização pode, efetivamente, fornecer dados conclusivos tornando-se uma ferramenta de elevada relevância no acompanhamento da estrutura durante as intervenções a que irá ser sujeita. A observação estrutural após uma intervenção pode ser usada na avaliação do desempenho de técnicas construtivas, da utilização de novos materiais, ou mesmo, na análise do comportamento da estrutura para as novas condições de serviço (Cavadas, 2008).

Os sistemas de monitorização da integridade estrutural, conhecidos na literatura internacional pela sigla SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*, podem ser classificados no que diz respeito ao nível de sofisticação do próprio sistema e ao tipo de informação que são capazes de fornecer (Bisby, 2004). Assim, existem quatro níveis de classificação de sistemas descritos seguidamente:

- **Nível 1:** o mais básico sistema de monitorização é capaz de detetar anomalias na estrutura, mas não consegue dar informações sobre a natureza, localização e gravidade da anomalia, não permitindo avaliar o estado de segurança da estrutura.

- **Nível 2:** ligeiramente mais sofisticado que o anterior, um sistema de nível 2 consegue detetar a presença de dano na estrutura e indicar a localização da mesma.
- **Nível 3:** neste nível, o sistema é capaz de detetar a anomalia, indicar a sua localização e ainda dar algumas indicações do seu grau de gravidade.
- **Nível 4:** o mais sofisticado nível é capaz de providenciar, detalhadamente, informações relativamente à natureza, localização e nível de gravidade da anomalia utilizando-as para a avaliação da segurança da estrutura.

No presente capítulo será abordado o conceito da monitorização da integridade estrutural, com ênfase nas suas características e constituição. Começa-se por fazer uma descrição da composição dos sistemas, descrevendo-se, brevemente, cada um dos componentes, desde a rede de sensores, passando pelos sistemas de aquisição, formas de comunicação da informação, o seu tratamento e armazenamento, até aos aspetos a ter em conta na interpretação e avaliação dos dados recolhidos para uma adequada avaliação do comportamento da estrutura.

No ponto 3, descrevem-se os diversos equipamentos sensoriais disponíveis no mercado para as diferentes grandezas de medição. São descritos os sensores adequados para medir deslocamentos, rotações ou a temperatura, apresentando-se o princípio de funcionamento completando com alguns exemplos mais utilizados na engenharia civil e as suas principais características técnicas, de acordo com os respetivos fornecedores.

Por fim, conhecendo as fraquezas associadas à utilização de sensores de base elétrica, nos pontos 2.3.2 e 2.3.3 é feita a referência a duas grandes evoluções nesta área, os sensores em fibra ótica e sensores sem fios, respetivamente.

2.2 Constituição dos sistemas de Monitorização

Um sistema de monitorização da integridade estrutural pode ser definido como um método de avaliação não destrutiva que recorre a um conjunto de sensores instalados ou embebidos numa estrutura. Estes sensores são capazes de obter vários tipos de dados, que são tratados, armazenados e avaliados para utilização futura (Bisby, 2004).

O princípio de funcionamento, tal como descrito na Figura 2.1, consiste na leitura de grandezas, previamente definidas, através de uma rede de sensores instalados na estrutura. Estas leituras são interrogadas pelo sistema de aquisição, que poderá condicionar o sinal e armazenar, ou enviá-lo diretamente através de um sistema de transmissão de dados. Nesta segunda via, os dados são recolhidos e armazenados num dispositivo próprio. Posteriormente, os dados recolhidos são tratados e transformados em informação adequada para avaliação do comportamento da estrutura.

Assim, os sistemas de monitorização da integridade estrutural são, essencialmente, compostos pelos seguintes componentes:

- Rede de sensores;
- Sistema de Aquisição;
- Sistema de Transmissão de Dados;
- Processamento e Tratamento de Dados e;
- Avaliação do Comportamento Estrutural.

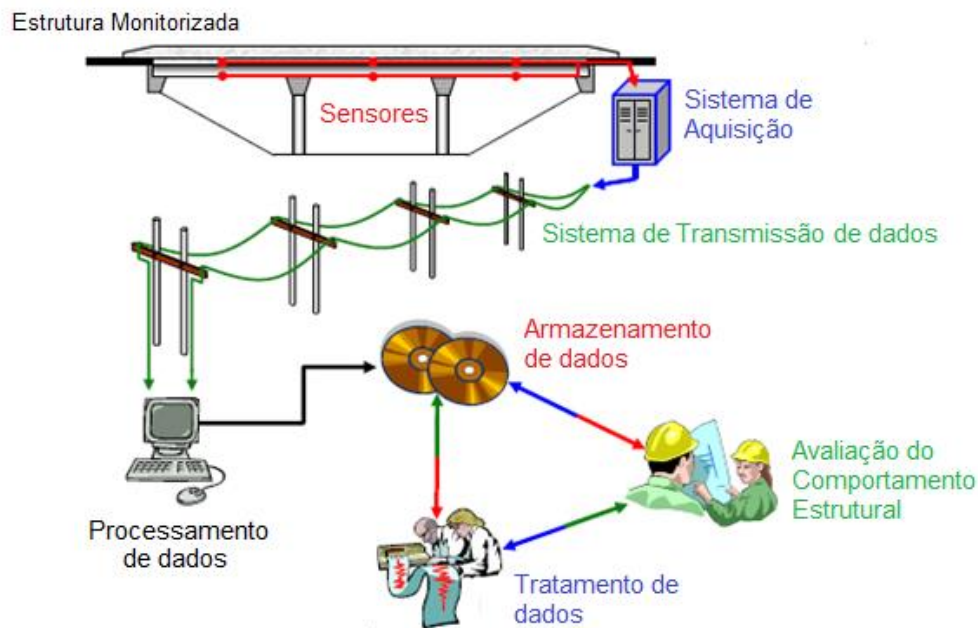


Figura 2.1: Composição de um sistema de Monitorização (Adaptado de Bisby, 2004)

2.2.1 Rede de Sensores

A rede de sensores, tal como o nome indica é um conjunto de sensores instalados na obra e é responsável por quantificar grandezas físicas definidas à priori e enviar a informação por mensagem para posterior aquisição, tratamento e análise.

Relativamente às grandezas a medir, existem dois tipos das quais se distinguem pelo carácter de análise global ou local da estrutura. No que diz respeito ao primeiro, interessa medir deslocamentos, abertura de juntas de dilatação, rotações, forças ou reações de apoio, entre outras. Já, relativamente ao comportamento local, sobressaem grandezas como tensões, extensões ou abertura de fendas.

Para além do referido anteriormente, existem também sensores para a medição das condições ambientais, tais como temperatura, humidade relativa ou vento. Ora, note-se que, por exemplo,

uma variação de temperatura para além de afetar o comportamento da estrutura, introduzindo deformações e tensões, também pode afetar as medições e funcionamento dos equipamentos, sendo imperativo o seu controlo permanente.

A seleção do tipo de sensores a instalar deve ser feita de acordo com a função a que se destinam e dos objetivos que se pretendam atingir para que forneçam informação o mais confiável possível. O número de sensores instalados e a sua localização são determinantes para a eficiência da monitorização e os dados recolhidos deverão ser representativos das características das secções instrumentadas dando informação do comportamento global da estrutural (Mufti et al, 2005).

Por outro lado, é necessário ter em atenção características ligadas à transmissão de sinal, durabilidade dos equipamentos, custos ou ainda limitações de instalação. Para a monitorização de estruturas, os sensores devem ser robustos, fiáveis e estáveis no tempo (Figueiredo, 2006). Deverão apresentar uma precisão elevada como característica, para que, em fase de serviço, os mesmos possam detetar a resposta da estrutura às pequenas alterações das solicitações a que a mesma está sujeita.

Para que a monitorização seja bem sucedida, os sensores, não só deverão ser protegidos ou compensados numa tentativa de anular qualquer efeito relativo à exposição a condições ambientais severas, como também o comprimento dos cabos de ligação ao sistema de aquisição deverá ser o menor possível ou, mesmo, inexistente (sensores sem fios) para evitar perdas de sinal ou possíveis interferências em forma de ruído (Mufti et al., 2005).

Finalmente, chama-se à atenção que, se se pretende uma monitorização contínua de longa duração, a escolha de sensores deverá ser mais criteriosa para se ter em conta que muitos equipamentos existentes no mercado são vulneráveis a danos por deterioração ao longo do tempo, levando a uma deficiente leitura das medições. Desta forma, mais uma vez, uma proteção adequada poderá controlar estes efeitos.

No desenvolvimento deste trabalho serão apresentados os sensores de base elétrica capazes de medir grandezas relativas ao comportamento global da estrutura. Grandezas como deslocamentos ou aberturas de juntas de dilatação e rotações serão alvo de discussão, por serem mais interessantes do ponto de vista de estudo do caso da Ponte de São João das Areias. Adicionalmente, também se fará referência a sensores capazes de aferir as condições ambientais, como a temperatura ambiente ou a temperatura nos materiais.

2.2.2 Sistemas de aquisição

Um sistema de aquisição, conhecido na literatura internacional como *Data Acquisition System*, *DAS*, permite a interrogação da informação proveniente da rede de sensores. Uma vez adquirida a informação, estes sistemas atuam, inicialmente num tratamento adequado dos mesmos, e posteriormente, na conversão apropriada de sinais elétricos (analógicos) em sinais digitais, que serão armazenados localmente ou disponibilizados numa plataforma de dados.

Um sistema de aquisição é, assim, constituído por três componentes principais:

- Condicionador de sinal
- Conversor analógico-digital (conversor A/D)
- Programa de aquisição de dados

Condicionador de sinal entende-se como um conjunto de processos, como a amplificação, filtragem e isolamento, cujo objetivo é a preparação dos sinais analógicos para a conversão em sinais digitais. A amplificação de sinal, tal como o nome indica, amplifica o sinal analógico por forma a ser ajustado à gama de entrada no conversor analógico-digital (A/D). Os filtros são responsáveis pela redução de ruídos e interferências que possam integrar o sinal. Já o isolamento, quando presente, permite proteger os restantes módulos do sistema de eventuais sobrecargas de corrente (Assis, 2007).

O conversor A/D é o componente com a tarefa mais importante de um sistema de aquisição, uma vez que desempenha a função de traduzir os sinais elétricos (analógicos) em sinais digitais, transformando-os em informação adequada para tratamento e análise. Características como a resolução, frequência, e a gama de medição definem o sistema de aquisição a instalar na obra a monitorizar.

Relativamente à aquisição de dados, são programas que têm como finalidade controlar o sistema de aquisição, dispondo de uma interface que permite esse controlo remota ou localmente.

A aquisição de dados numa obra pode ser conseguida recorrendo a uma de duas formas. A primeira, implica o recurso a placas de aquisição integradas em *PC*'s. Apesar de ser mais económica e potente, conduz a sistemas centralizados, necessitando de fios/cabos de grandes comprimentos de ligação aos sensores e da permanência de um *PC* em obra, mesmo em condições ambientais muito agressivas (Félix et al., 2004).

A segunda de forma de aquisição de dados recorre a sistemas de funcionamento autónomo. Na verdade, esta solução é menos potente, e como interroga um número inferior de sensores, torna-se uma solução mais dispendiosa. No entanto, permite, para além de ligação em rede, a distribuição de instrumentalização na estrutura conseguindo um menor comprimento dos cabos de ligação e, conseqüentemente, menos interferências no sinal (Félix et al., 2004). Para além disso, é evitado o contacto de equipamentos com o meio ambiente, já que nesta opção os sistemas estão muitas vezes inseridos em armários ou caixas de proteção.

Na Figura 2.2, encontra-se um bom exemplo de um sistema de aquisição com funcionamento autónomo e muito usado na monitorização de pontes, o equipamento DT800 da *Data Taker*. Utilizado para adquirir dados de uma rede de sensores elétricos, este equipamento é robusto, de boa resolução e alta velocidade, caracterizado por uma extensa capacidade de comunicação e

armazenamento. Alimentado por bateria interna cuja autonomia permite que possa integrado permanentemente numa obra e controlado remotamente.



Figura 2.2: Sistema de Aquisição DT800 da Data Taker

Seguidamente apresentam-se, em forma resumida, algumas das principais características destes equipamentos:

- Sistema de aquisição versátil (possibilidade de ligação a diversos sensores);
- 16-bits de resolução;
- Bateria interna;
- Possibilidade de ligação de rede através de protocolos de comunicação Ethernet;
- Cartão de memória interno e externo;
- 12 canais analógicos + 16 canais digitais;
- Gama de temperaturas de operacionalidade: -45° a 70°C ;
- Emissão automática de alarmes sempre que determinados limites pré-estabelecidos são ultrapassados.

Outro exemplo, presente na Figura 2.3, e neste caso para aquisição de sinais provenientes de sensores em fibra ótica, é o si325 da *Micron Optics*, trata-se de um sensor portátil que abrange a totalidade da gama de leituras, e as suas principais características são:

- Elevada resolução;
- Boa autonomia na bateria interna;
- Possibilidade de ligação de rede através de protocolos *Ethernet* ou via USB;
- Conversor A/D incluído;
- Gama de temperatura de operacionalidade: -20°C a 70°C ;
- Possibilidade de representação de dados a tempo real no mostrador.



Figura 2.3: Sistema de Aquisição si325 da Micron Optic

2.2.3 Sistema de transmissão de dados

O sistema de transmissão de dados é o componente que permite fazer a comunicação dos dados do sistema de aquisição instalado na obra para o local onde irão ser tratados e analisados. Um bom sistema de comunicação deve garantir o envio dos dados com integridade, para que os mesmos sejam recolhidos sem perdas significativas (Assis, 2007).

A transmissão de dados pode ser conseguida, de uma forma mais básica, recorrendo a ligação direta entre o sistema de aquisição e o computador, através, por exemplo, da ligação USB.

Outra forma, mais moderna e usual para transmissão de dados continuamente, é feita através de linhas telefónicas, da internet, ou mesmo transmissão por rádio ou telemóvel. Esta forma torna-se preferível uma vez que permite a monitorização remota da estrutura, e elimina a necessidade de visitas ao local da obra. Para além disso, permite aos utilizadores o acesso aos sistemas de aquisição e às suas funcionalidades, como por exemplo, o ajuste da capacidade de armazenamento ou modificações na programação do sistema.

2.2.4 Processamento e Tratamento de dados

A quantidade de informação recolhida pelos sensores, por vezes, é muito grande, o que pressupõe que muita da informação disponível não apresenta relevância não sendo, por isso, necessária para armazenamento. Neste sentido, é conveniente realizar um eficaz processamento de dados mesmo antes dos mesmos serem disponibilizados para análise, com o objetivo de conseguir uma maior facilidade e rapidez na visualização dos mesmos.

No que diz respeito ao tratamento de dados, este tem como principal objetivo remover qualquer ruído ou interferência que possam estar contidos na informação, providenciando clareza e qualidade aos resultados obtidos.

Existem inúmeras técnicas de tratamento de dados, entre as quais se pode destacar a filtragem. A filtragem, nesta fase, assenta sobre aplicações a nível estatístico da informação recolhida, como a representação de valores num determinado instante juntamente com médias de leituras em instante anteriores e posteriores.

Outro fator importante nesta etapa passa pela correção dos efeitos térmicos. Ora, caso os sensores não sejam autocompensados, é necessário remover os efeitos negativos que a temperatura tem sobre os equipamentos e consequentemente sobre as leituras.

Uma vez os dados devidamente processados, estes terão de ser armazenados para visualização. A base de dados é responsável pelo armazenamento dos mesmos, durante um adequado período de tempo, permitindo uma visualização do comportamento da estrutura monitorizada no presente ou, mesmo, em situações futuras.

2.2.5 Avaliação do Comportamento da Estrutura

A análise de dados recolhidos é a principal etapa num sistema de monitorização de uma estrutura. É de esperar que as informações recolhidas permitam avaliar a condição da estrutura e que possíveis soluções a implementar sejam aplicadas com segurança.

Na grande maioria das vezes, a necessidade de avaliação de determinadas grandezas numa estrutura prende-se com a verificação de hipóteses e parâmetros adotados na fase de projeto e na deteção de danos tanto na fase construtiva como na fase de serviço, cujo principal objetivo é a garantia da segurança na fase de serviço (Assis et al., 2007). No que respeita a estruturas sujeitas a reparação ou reforço, a grande preocupação incide sobre a avaliação, não só da eficiência das soluções empregues, como também da resposta da estrutura a essa mesma intervenção.

Para que um sistema de monitorização seja confiável é necessário que a equipa envolvida detenha o conhecimento necessário para a adequada concretização de todas as fases do projeto, desde o planeamento da monitorização, até à seleção da instrumentação, tratamento e interpretação de resultados.

2.2.5.1 Modelos Numéricos de Análise Estrutural

Na fase de avaliação do comportamento da estrutura, os modelos numéricos são parte integrante do sistema de monitorização na medida em que ajudam na caracterização e definição do comportamento estrutural. Através destes é possível a verificação de resultados obtidos na monitorização, a realização de estudos sobre a estrutura, a modelação de danos estruturais e a previsão de determinados comportamentos da estrutura face aos diferentes estímulos.

No entanto, deverão estar presentes neste processo as dificuldades inerentes à construção de um modelo. A avaliação do comportamento da estrutura, durante a sua vida útil, por si só, já se trata de um desafio, aumentado quando se juntam incertezas ligadas às diferentes características dos materiais, da própria estrutura ou mesmo das ações a que estão sujeitas. Características como o módulo de elasticidade dos materiais, as condições de apoio, a ligação entre elementos ou a presença de fissuração são geralmente difíceis de quantificar e transportar para o modelo.

Porém, processos como a discretização em elementos finitos, a calibração e validação do modelo podem ser bastante conclusivos e proporcionar um adequado ajuste dos parâmetros intervenientes na construção do mesmo, tornando-o uma ferramenta confiável, conseguindo uma representação do comportamento da estrutura, o mais próximo possível da realidade.

2.3 Grandezas de medição e tipos de sensores

A rede de sensores, tal como referido anteriormente, corresponde ao conjunto de equipamentos instalados em diversos pontos ou seções e que permitem medir determinadas grandezas pré-definidas. Sobre este subcapítulo do trabalho será feito uma pequena abordagem referente aos sensores utilizados consoante a grandeza que se pretende medir. Mais uma vez, volta-se a salientar que apenas se fará referência às grandezas de interesse para o caso em estudo, a Ponte de São João das Areias. Assim, as grandezas serão os deslocamentos, as rotações e a temperatura.

Relativamente ao tipo de sensores, visto que na obra de estudo se recorreram a sensores de base elétrica, será sobre esses mesmo que se fará o estudo mais intensivo. No entanto, será feita também uma breve referência a duas inovações neste âmbito, sensores em fibras óticas e sensores sem fios ou wireless, apresentados, respectivamente, nos pontos 2.3.2 e 2.3.3.

2.3.1 Sensores de base elétrica

Simplificadamente, sensores podem ser considerados como elementos integrados num sistema linear que transformam, através de uma função de transferência, uma grandeza física de resposta da estrutura, como um deslocamento, numa informação de grandeza elétrica, como uma variação de tensão ou corrente (Figueiredo, et al., 2006). Uma das características que os definem é a sensibilidade (s), que se entende como a gama de valores entre os sinais de entrada e de saída na qual se insere o funcionamento do sensor. A sensibilidade é dada pelo quociente entre a variação de tensão ou corrente de saída ΔY e a variação da grandeza de medição ΔX , expressa na equação 2.1.

$$s = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (2.1)$$

A sensibilidade de sensores é expressa numa grande variedade de grandezas, dependentes do tipo de sensor e da grandeza à qual se destinam. Tome-se como exemplo, um sensor de temperatura, a sua sensibilidade vem em $\Omega/^\circ\text{C}$. Uma boa escolha de sensores, deve basear-se, na sensibilidade dos mesmos, que não só deve seguir uma relação linear (atenuação de ruídos), como também deve ser alargada e constante em todo o campo de utilização.

Os sensores de base elétrica são os mais utilizados na engenharia civil (Félix; Rodrigues; Faria, & Figueiras, 2012). Neste sentido, uma das grandes vantagens reside na experiência na sua utilização. No entanto, apresentam outras características vantajosas que evidenciam a sua eficácia, tais como:

- Grande variedade de opções de equipamentos;
- Possibilidade de cobrir todas as grandezas de interesse;
- Largos campos de utilização;

- Altos níveis de precisão;
- Compatibilidade com diversos sistemas de aquisição, soluções de conversão e condicionamento de sinal;
- Baixo custo.

Porém, também é possível associar algumas desvantagens, entre as quais se destacam as seguintes:

- Alta sensibilidade a interferências elétricas e magnéticas;
- Perdas de sinal;
- Mau funcionamento para pontes extensas (grandes distâncias ao sistema de aquisição).

2.3.1.1 Sensores de Deslocamento

O deslocamento pode ser definido como a variação de posição de um corpo em relação a um determinado referencial, num determinado intervalo de tempo e a sua medição constitui uma componente de elevada relevância no âmbito da monitorização estrutural de pontes. A medição de deslocamentos permite avaliar o comportamento linear de uma estrutura à medida que vai estando sujeita às diferentes ações e, ainda, se a estrutura é capaz de regressar à posição inicial quando se verifica o descarregamento dessas mesmas ações.

Existem inúmeros instrumentos destinados à medição de deslocamentos, sendo os transdutores capacitivos, resistivos e indutivos os que merecem destaque por serem os mais utilizados.

- **Transdutores capacitivos**

Nos transdutores capacitivos, o elemento sensor é constituído por um condensador, o qual apresenta uma variação do valor da sua capacidade em função da variação do deslocamento medido. Este equipamento é constituído por duas placas condutoras paralelas separadas por uma película muito fina de um material dielétrico (Figura 2.4a) que se move em conjunto com a peça que se pretende medir. O deslocamento da película relaciona-se com a variação da capacidade do condensador, podendo assim apresentar numericamente o valor do deslocamento medido (Assis, 2007).

Um exemplo de um transdutor capacitivo disponível no mercado é o comparador digital capacitivo que permite medir deslocamentos com resolução até 0.0005 mm, presente na Figura 2.4b.

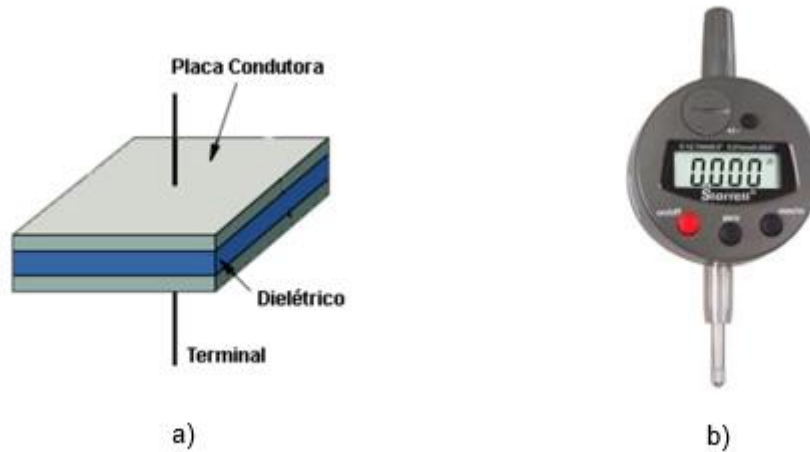


Figura 2.4: Esquema de Funcionamento de um transdutor capacitivo (a) e Comparador digital de deslocamento (b) (Assis, 2007)

- **Transdutores resistivos**

Relativamente aos transdutores de deslocamento resistivos, estes correlacionam a variação de deslocamento com a variação de potencial ou de intensidade da corrente elétrica que se verifica no elemento sensor (Félix, 2004). Uma solicitação externa no elemento instrumentado que produza uma variação de deslocamento vai levar ao desvio de um cursor no elemento sensor que provoca variações na sua resistência (Figura 2.5). O deslocamento verificado num determinado ponto de interesse é determinado através de uma relação previamente estabelecida entre o mesmo e a resistência do elemento sensor.

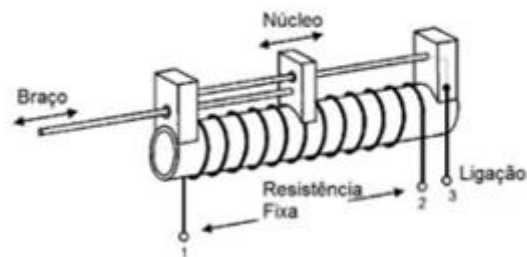


Figura 2.5: Princípio de funcionamento de um transdutor resistivo

Na Figura 2.6 apresenta-se um exemplo de um transdutor resistivo da gama de sensores fornecido pelo grupo *SLB Automação*, e na Tabela 2.1 as suas principais características.



Figura 2.6: Exemplo de um transdutor resistivo da SLB Automação

Tabela 2.1: Principais características técnicas do transdutor resistivo da SLB Automação

Sensor	Campo de utilização	Resistência	Sinal de saída	Temperatura de utilização
Modelo RTL/ERTL	30 a 1250 mm	5 a 10 kOhm	4 a 20 mA	-20°C a 80°C

- **Transdutores indutivos- LVDT**

O LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) é o mais utilizado exemplo de transdutor indutivo. A sua estrutura, presente na Figura 2.7, é constituída por um núcleo móvel de material impermeável, uma bobina primária alimentada por tensão alternada e, por fim, duas bobinas secundárias dispostas em série e em oposição, que por estarem acopladas à bobina primária possuem tensões induzidas.

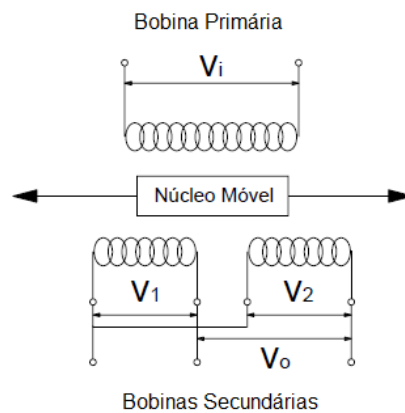


Figura 2.7: Estrutura básica de um LVDT (Adaptado de Figueiredo, 2006)

O núcleo, quando excitado, é responsável por proporcionar interação do campo magnético entre a bobina principal e as bobinas secundárias, gerando tensões nas duas últimas. Quando o núcleo móvel se desloca, provoca um aumento de tensão numa das bobinas secundárias e consequente diminuição na outra. É através da diferença de tensões nas bobinas secundárias que se consegue medir o deslocamento relativo entre dois pontos. A tensão verificada nas bobinas varia linearmente com o deslocamento do núcleo.

Na Figura 2.8 apresentam-se exemplos de LVDT's da série DCTH do grupo RDP.



Figura 2.8: Transdutores indutivos de deslocamento, LVDT's (RDP)

Estes equipamentos apresentam vantagens como elevada precisão com várias gamas de medições, uma resolução, teoricamente, infinita e elevado tempo de vida já que, devido a sua tecnologia inovadora, não apresentam grande desgaste no elemento sensor. Na Tabela 2.2 apresentam-se as principais características técnicas de um dos LVDT's mais utilizado na monitorização estrutural de pontes.

Tabela 2.2: Principais características técnicas dos LVDT's fornecidos pela MRA do Grupo Álava

Tipo	Campo de utilização	Sinal de saída	Fonte de energia	Gama de frequência
DCTH2000	±50mm	4 a 20 mA	DC	0 a 200 Hz

2.3.1.2 Sensores de Rotação

A medição de rotações em estruturas de engenharia civil é feita através da variação angular de um dado eixo em relação a um plano de referência, segundo uma direção (inclinómetro uniaxial), ou mesmo, duas direções perpendiculares entre si (inclinómetro biaxial).

Das várias opções de equipamentos disponíveis no mercado destaca-se o inclinómetro elétrico. Este sensor de inclinação permite medições de variações angulares em relação a um plano horizontal ou vertical e possibilita a sua integração num sistema automático de aquisição.

- **Inclinómetros elétricos**

Como exemplo deste tipo de equipamentos, mostra-se na Figura 2.9, um inclinómetro uniaxial da série LSOC da *Jewell Instruments*. Trata-se de uma série de sensores muito robustos e de alta resolução, que apresenta diversos campos de medida (de $\pm 1^\circ$ até $\pm 90^\circ$).



Figura 2.9: Inclinómetro uniaxial da série LSOC, *Jewell Instruments*

Estes equipamentos permitem a medição de rotações segundo apenas um eixo. Devido a variações angulares do objeto instrumentado em relação ao eixo de referência (horizontal ou vertical), gera-se o movimento de um pêndulo presente no interior do sensor que é contrariado por um campo magnético. Em função deste movimento é gerado um sinal elétrico que é amplificado e, posteriormente, registado no sistema de aquisição.

Estes sensores são particularmente úteis na monitorização de pontes. Por um lado, como referido anteriormente, são equipamentos robustos e como tal, possíveis choques e vibrações que possam ocorrer na estrutura não inviabilizam a precisão das medições. Por outro lado, o facto de possuírem uma caixa de proteção permite a sua utilização em ambientes exteriores. As principais características de um dos modelos da *Jewell Instruments* podem ser consultadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Principais características técnicas do inclinómetro uniaxial LSOC-1 da *Jewell Instruments*

Tipo	Número de eixos	Campo de utilização	Sinal de saída	Temperatura de utilização
LSOC-1	1	$\pm 1.0^\circ$	4 a 20 mA	-20°C a 70°C

2.3.1.3 Sensores de Temperatura

O efeito da temperatura, como é sabido, tem uma enorme influência na resposta a deformações de uma estrutura, daí o seu controlo ter um papel crucial na análise da mesma, durante a sua vida útil. No âmbito da monitorização da integridade de estruturas a medição da temperatura, não só, tem efeitos sobre a própria estrutura, como também sobre os diversos equipamentos sensoriais aplicados em obra.

A possibilidade de medir a temperatura ambiente, ou até mesmo, a temperatura nos diversos materiais é conseguida através de uma vastíssima diversidade de equipamentos, sendo os mais conhecidos os termopares e os detetores de temperatura resistivos.

- **Termopares**

Um termopar é formado por dois fios metálicos, de natureza distinta ligados numa das extremidades, ao qual se dá o nome de junta quente ou de medição, no ponto onde se pretende medir a temperatura. A outra extremidade dos fios é encaminhada para o instrumento de medição, designando-se como junta fria ou de referência. Esta configuração permite estabelecer um circuito elétrico fechado por onde passa uma corrente elétrica, à qual se dá o nome de força eletromotriz, (f.e.m.), e que é proporcional à diferença de temperaturas entre as duas extremidades. A temperatura presente na junta de referência é constante e conhecida, assim, sabendo o valor da corrente elétrica que atravessa o circuito (medida no sistema de aquisição), é possível conhecer a temperatura no ponto pretendido.

Na Figura 2.10 apresenta-se um exemplo de termopar da série CS do *Grupo ECIL*.



Figura 2.10: Termopar da série CS do Grupo ECIL.

Existem inúmeros tipos de termopares dentro das diferentes séries, que se distinguem pelos metais pelo qual são constituídos, pela linearidade, sensibilidade e resistência às condições ambientais. Na Tabela 2.4 estão resumidas as características de três tipos de termopares, tipos T, E e K.

Tabela 2.4: Comparação entre diferentes tipos de termopares (Fonte: Grupo ECIL)

Tipo	Nome do elemento	Temperatura de utilização	Limite de erro padrão
T	Cobre/Constantan	-200°C a 370°C	±1.0°C
E	Chromel/Constantan	-200°C a 870°C	±1.7°C
K	Chromel/Alumel	-200°C a 1260°C	±2.2°C

Na aplicação a estruturas de engenharia civil os termopares são mais económicos e mais resistentes quando aplicados em situações de elevadas vibrações e choques mecânicos. Apresentam dimensões reduzidas, pelo que são facilmente ajustados a situações particulares.

- **Detetores de Temperatura Resistivos (RDT)**

Os detetores de temperatura resistivos, mais conhecidos pela sigla RDT, do inglês, *Resistance Temperature Detector*, são os sensores de temperatura mais utilizados para monitorização de pontes. Em comparação com os anteriores, apresentam maior precisão para a mesma gama de medição, e maior estabilidade ao longo do tempo dado pelo material pelo qual são constituídos, geralmente, a Platina, o Cobre ou o Níquel.

O princípio de funcionamento destes sensores assenta sobre uma relação entre a variação de resistência eléctrica dos materiais com a temperatura. Esta relação depende do condutor utilizado no elemento sensor, da exatidão desejada e do intervalo de valores de temperatura que se pretenda medir.

O RDT mais utilizado na engenharia é o PT100, designação que nasce por apresentarem uma resistência de 100Ω à temperatura de 0°C. Este sensor apresenta como principais características as reduzidas dimensões, uma rápida resposta térmica, para além de uma grande precisão de medição. Na Figura 2.11(a) apresenta-se um elemento sensor do tipo PT100, conforme é

fornecido pelo *Grupo ECIL*, sendo que para aplicação em obra os mesmos são protegidos através de encapsulamento em tubos de cobre ou aço inox (Figura 2.11(b)).

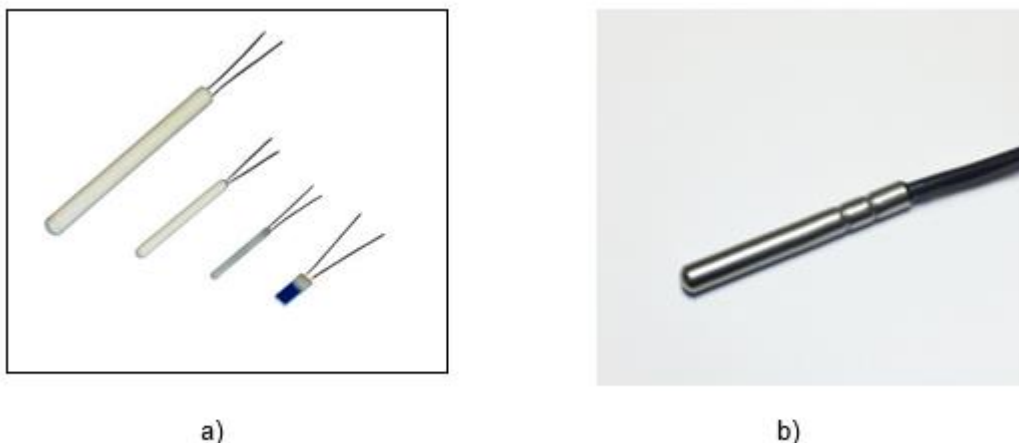


Figura 2.11: Elemento sensor (a) e sensor protegido para aplicação em obra (b). Fonte: Grupo ECIL

Na Tabela 2.5 estão resumidas as características gerais do RDT constituído pelo metal Platina, mais especificamente o PT100.

Tabela 2.5: Características técnicas do sensor PT100 do Grupo ECIL

Tipo de sensor	Campo de Temperatura	Resistência base	Observações
Platina	-260°C a 960°C	100Ω a 0°Ω	Limite de erro dado por equação e depende da classe do sensor definido em normas específicas

2.3.2 Sensores em fibra ótica

Sensores em fibra ótica têm vindo a ser aplicados com sucesso na engenharia civil, especialmente na aplicação de sistemas em pontes de betão armado (Li; Li & Song, 2004). Estes dispositivos permitem medir grandezas físicas mediante uma alteração das propriedades da luz propagada na fibra ótica (Rodrigues, Félix, Figueiras, 2013). As fibras óticas são pequenos filamentos de vidro ou plástico extrudido que possuem uma direção de propagação característica, ao longo da qual uma onda se propaga sem grandes perdas de informação, razão pela qual são muito utilizadas para transmissões a longas distâncias. A sua estrutura,

apresentada na Figura 2.12, divide-se em três essenciais elementos: o núcleo, com diâmetros entre os 5 e os 50 micrómetros (μm); a casca, camada que envolve o núcleo com espessuras de 120 a 200 μm ; e a capa ou revestimento, geralmente de material plástico, cujo objetivo prende-se com a proteção do interior contra danos mecânicos (Assis, 2007).

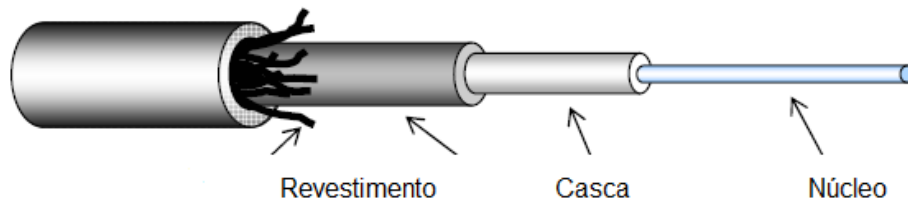


Figura 2.12: Estrutura de uma fibra ótica (Adaptado de Bisby, 2005)

O princípio fundamental de funcionamento da propagação de luz numa fibra ótica baseia-se no fenómeno de reflexão total. Para que este fenómeno seja possível é necessário que exista um diferencial de índices de refração, sendo que o núcleo possui um índice superior ao da casca ($n_f > n_b$). Assim, juntamente com um adequado ângulo de incidência (inferior ou igual ao ângulo limite), o feixe de luz que é lançado numa extremidade percorre o núcleo através de reflexões internas sucessivas, tal como se descreve na Figura 2.13.

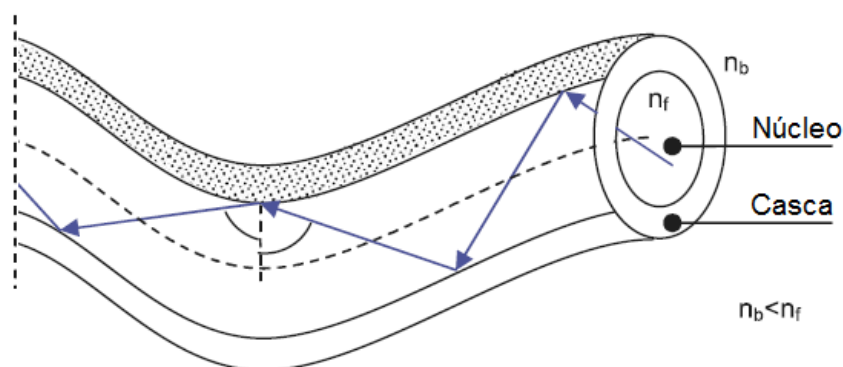


Figura 2.13: Princípio de funcionamento de uma fibra ótica (Félix, 2004)

Na monitorização estrutural, existem diversos tipos de sensores em fibra ótica, sendo os mais conhecidos os *sensores de bragg*, que se baseiam na modelação do comprimento de onda e em que o mecanismo do sensor está incorporado na própria fibra. O processo de funcionamento deste sensor tem por base a variação do comprimento de onda de *bragg* em relação ao

comprimento de onda original devido a variações na grandeza de medição, por exposição a ações externas.

Esta solução, muito utilizada na medição de extensões, apresenta como principais benefícios a sua ausência de sensibilidade a interferências de campos eletromagnéticos e a reduzida perda de sinal, o que já se entende como um grande avanço em relação aos sensores tradicionais.

No entanto, por ser uma tecnologia mais recente, é economicamente menos viável, especialmente quando se pretende uma monitorização em larga escala com muitos pontos ou seções instrumentadas. Para além disso, como a base destes sensores são as fibras óticas, estas conferem ao equipamento uma fragilidade acrescida e uma inerente dificuldade de reparação.

2.3.3 Sensores sem fios

Com o avanço da tecnologia, é agora mais usual o recurso a sensores sem fios em sistemas de monitorização da integridade estrutural. Uma rede de sensores sem fios é uma rede que consiste em dispositivos autónomos, distribuídos espacialmente, aos quais se dá o nome de nós-sensores. Os nós-sensores têm a capacidade de se comunicarem entre si e com estações de interrogação, conversão e armazenamento local do sinal, sendo, a informação, posteriormente transmitida através de Ethernet ou USB para uma estação central, o *gateway*.

Existem diversas configurações de redes de sensores sem fios que se diferenciam, essencialmente, pela comunicação entre nós e pela distância entre seções a monitorizar. Na primeira, designada por estrela, cada nó mantém uma única ligação com o *gateway*, a configuração é muito simples, mas apenas permite alcançar distâncias reduzidas. Na segunda, um pouco mais complexa, do tipo Cluster, os nós-sensores estão ligados em rede tipo árvore. Os nós apresentam apenas um caminho de transmissão para o *gateway*, mas a informação é encaminhada através de outros nós, nós encaminhadores. Nesta configuração, deverá ter-se especial atenção à falha de um nó encaminhador, que, ao acontecer, impede a transmissão de informação proveniente de nós afluentes. Por forma a contornar este problema tem-se a última hipótese de configuração, a rede em malha. Na malha os nós apresentam comunicação por

múltiplas vias e caracteriza-se por ser altamente confiável dada a redundância nas diferentes leituras. As diferentes configurações podem ser vistas na Figura 2.14.

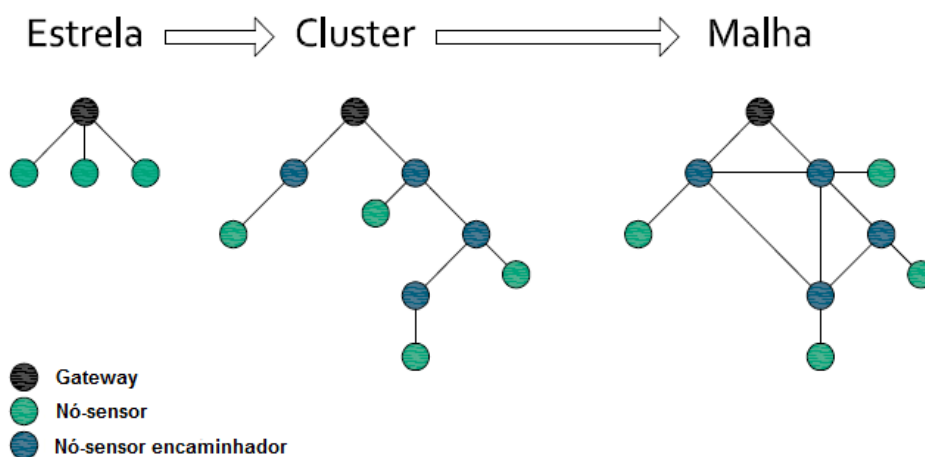


Figura 2.14: Diferentes configurações de uma rede sem fios, (Faria, 2010)

Esta tecnologia nasceu por ser recorrente a ineficácia da utilização de sensores tradicionais, especialmente, quando é necessário vencer uma grande distância entre os sensores e os sistemas de aquisição, muito usual em pontes extensas. Assim, a utilização destes equipamentos torna-se mais sustentável, e apesar de ser uma opção economicamente menos acessível, mais lenta e menos segura, é de mais fácil instalação, reparação e manutenção.

A principal desvantagem em relação à utilização destes sensores prende-se com a dificuldade de transmissão de sinal através de ambientes fechados, como seções maciças, ou à sua utilização de forma embutida.

2.4 Considerações finais

No presente capítulo foi apresentado o conceito de monitorização da integridade estrutural, focando o sistema de monitorização como um meio viável à caracterização do comportamento de uma estrutura, especialmente relativamente a pontes e viadutos. O grande objetivo aqui presente foi o de apresentar, ainda que de uma forma um pouco teórica, os diferentes constituintes de um sistema de monitorização, a importância do recurso a um modelo de simulação numérica e ainda os diferentes equipamentos sensoriais utilizados na monitorização de obras em engenharia civil.

Ainda a título de introdução, começou-se por descrever resumidamente a importância e as vantagens de empregar sistemas de monitorização em obras de arte existentes, fazendo uma

pequena referência ao que de facto motiva a sua utilização nos dias de hoje. Note-se que um sistema de monitorização permite, não só um acompanhamento permanente do estado de conservação de uma estrutura, como também possibilita uma avaliação do comportamento da estrutura na fase construtiva ou durante a sua vida útil.

Nunca é de mais salientar a importância da escolha de sensores à luz de fatores como as grandezas de medição, a sua instalação ou a duração e em que condições se pretende a sua utilização. A extensão da estrutura instrumentada é uma questão a ter em consideração visto que a utilização de cabos que pretendam vencer grandes distâncias ao sistema de aquisição pode não ser uma solução muito viável.

Para a garantia de um sistema de sucesso com resultados fiáveis, a rede de sensores e sistemas de aquisição deverão ser o mais fiáveis e robustos, com pouca vulnerabilidade aos efeitos das adversas condições ambientais, como a temperatura ou o vento.

Relativamente ao processamento e tratamento de dados deverão ser desenvolvidos algoritmos eficientes para uma adequada seleção da informação recebida pelos sensores, e a utilização de ferramentas como filtragem torna-se crucial para que a informação armazenada seja limpa de ruídos ou interferências, proporcionando clareza na análise de resultados.

A facilidade de interpretação de resultados é um elemento de especial importância no que toca à avaliação do comportamento da estrutura. Nesta fase, é recorrente o recurso a modelos numéricos construídos com base em dados reais.

Os modelos numéricos quando devidamente calibrados, tornam-se potentes ferramentas na avaliação da integridade estrutural de uma estrutura e de apoio ao processo de tomada de decisão tanto para soluções de reparação e reforço como para operações de manutenção da estrutura.

Finalmente, numa tentativa de fazer face às fragilidades da utilização de sensores tradicionais, os desenvolvimentos tecnológicos possibilitaram a criação de equipamentos inovadores como é o caso de sensores em fibra ótica, que não apresentam vulnerabilidade a interferências elétricas e magnéticas e sensores sem fios, que garantem a total confiabilidade em pontes muito extensas.

A título de conclusão, a crescente tendência para recorrer a sistema de monitorização estrutural, em engenharia civil, deve-se essencialmente à necessidade de melhorar e rentabilizar as soluções de manutenção de estruturas existentes. Claro está, que apenas se torna viável recorrer a estes sistemas devido aos recentes desenvolvimentos de novos, funcionais e económicos sensores e sistemas de aquisição e na reinvenção de poderosas formas de comunicação de dados permitindo maior eficiência em todo o processo de análise.

3. A Ponte de São João das Areias

3.1 Considerações iniciais

O projeto de reabilitação da ponte de São João das Areias, uma das obras de arte que integra o empreendimento da Barragem da Aguieira deveu-se, essencialmente, a um processo expansivo dos betões que a constitui devido a reações alcalis-silica e às suas possíveis implicações na segurança estrutural da mesma.

Neste âmbito, a ponte foi sujeita a diversas inspeções, realizadas nos meses de Agosto e Setembro de 2010, das quais compreendem inspeções principais, realizadas ao tabuleiro, aparelhos de apoio e fustes de pilares, e inspeções subaquáticas, para análise do estado de conservação da parte imersa dos fustes dos pilares, embasamentos e fundações. Posteriormente, foram realizadas algumas sondagens de prospeção geotécnica, para averiguar as condições dos terrenos de fundação da ponte.

As inspeções visuais realizadas à ponte foram conclusivas, as anomalias na ponte são significativas e a mesma deverá ser sujeita a obras de requalificação e reparação, que consistem em alterações de alguns pilares e suas fundações.

Para um acompanhamento contínuo da obra durante a fase de serviço da ponte antes e durante as obras de reabilitação, foi instalado um sistema de monitorização. Este sistema, constituído por uma rede ramificada de sensores de base elétrica, tem como objetivo a medição, para além da temperatura ambiente e da temperatura nos materiais, as rotações no topo dos pilares e deslocamentos nas juntas de dilatação junto aos encontros nas margens esquerda e direita.

Neste contexto, o presente capítulo inicia-se com uma descrição geral da obra de arte em estudo. Seguidamente é feita uma breve referência às inspeções a que a mesma foi sujeita com ênfase nas conclusões retiradas e nas soluções de reforço a que a ponte foi submetida. Posteriormente, é feita uma descrição dos diversos componentes do sistema de monitorização instalado na ponte, como o tipo de sensores adotados, sistemas de aquisição entre outros.

Finalmente, o autor optou por, neste capítulo, apresentar, de uma forma mais geral os resultados provenientes da observação da estrutura. Serão feitas algumas considerações no que diz respeito ao comportamento global da estrutura, numa ótica mais global de análise dos resultados.

3.2 Descrição Geral da Obra

A obra em causa é a Ponte de São João das Areias, que se localiza no distrito de Coimbra na EN234-6 e que faz a ligação entre São João das Areias e o Concelho de Tábua.

A Ponte, projetada pelo Prof Edgar Cardoso e construída nos finais dos anos 70, apresenta um tabuleiro, em betão armado e pré-esforçado com uma extensão total de 260 m, distribuídos por sete tramos, dos quais cinco são intermédios de 40 m e os restantes dois são de extremidade com 30 m de comprimento (30 m + 5x40 m + 30 m). Na Figura 3.1, é possível ver a planta, alçado da ponte de São João das Areias e ainda uma fotografia da obra em questão.

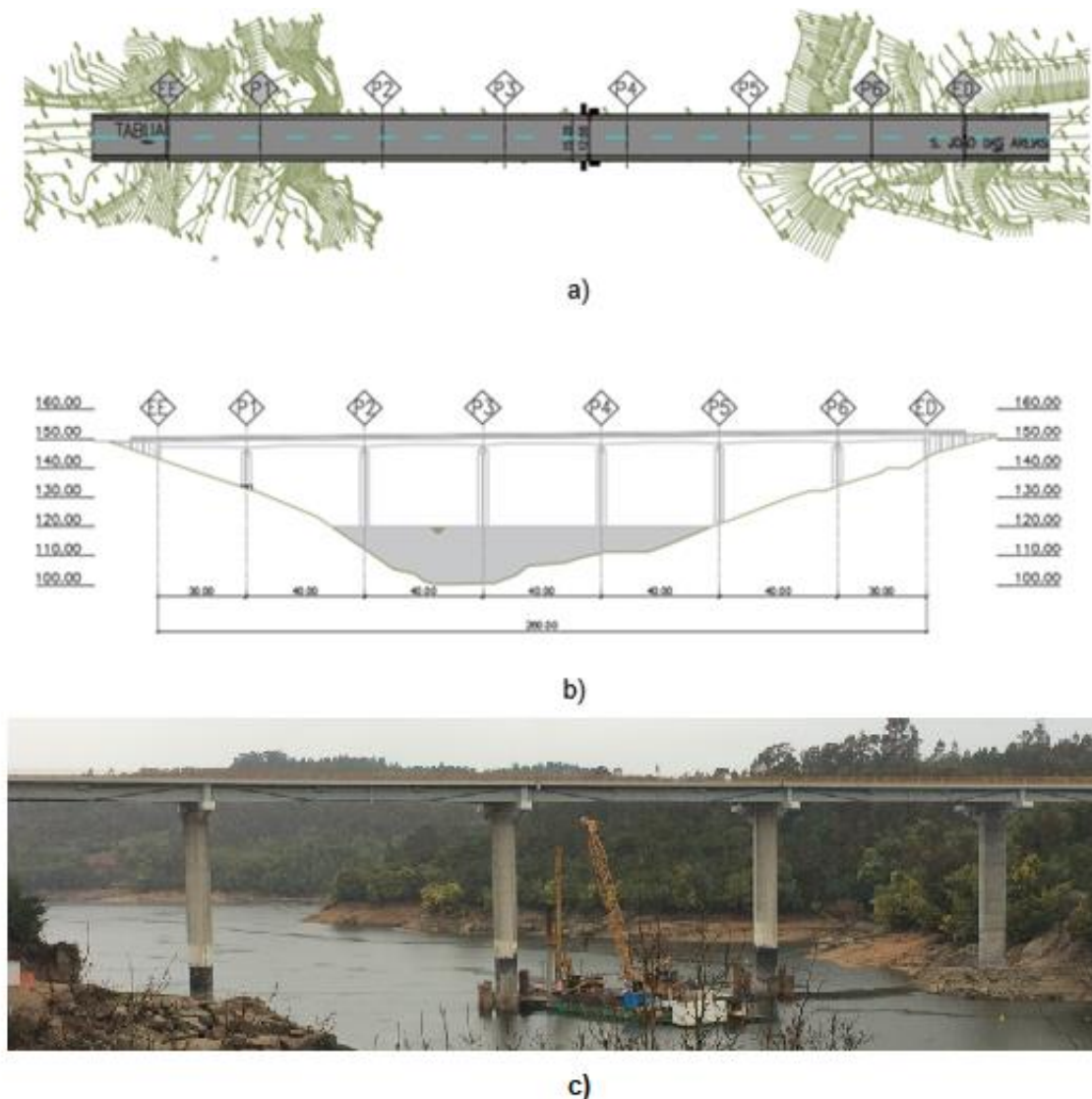


Figura 3.1: Planta (a), alçado (b) e fotografia da obra (c) da ponte de São João das Areias

A secção transversal do tabuleiro é em laje vigada, com 4 vigas longitudinais distanciadas de 4 m. As vigas têm altura variável desde 2,0 m a meio vão dos vãos intermédios até 2,50 m nas

secções sobre os pilares. Quanto à espessura, esta é constante de 0,30 no terço central dos vãos intermédios e variável entre 0,30 e 0,50 m nos terços laterais (Figura 3.2(a) e Figura 3.2(b)). A laje entre vigas é de espessura variável, com 0,16 m no meio vão transversal e 0,25 m nas secções de ligação às vigas.

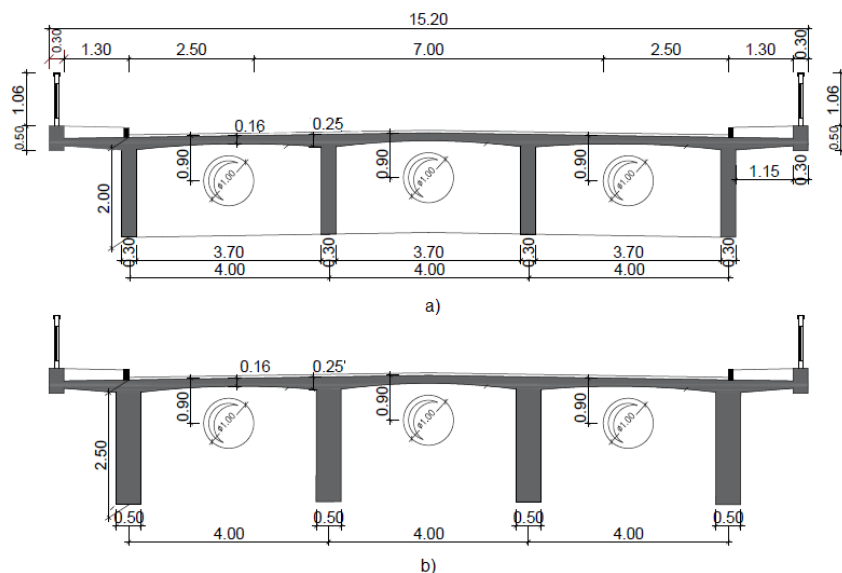


Figura 3.2: Secções Transversais a 1/3 do vão (a) e sobre os apoios (b)

O tabuleiro da ponte é apoiado sobre 6 pilares semelhantes, numerados de P1 a P6 na direção de Tábua para São João das Areias, tal como se indica na planta e alçado anteriores (Figura 3.1). Os pilares têm fuste único e secção transversal em losango, vazada, de espessura de 0,20 m e com eixos de dimensões de 3,0 m e 6,0 m (Figura 3.3). A ligação entre o tabuleiro e os pilares é feita por meio de capitel com altura variável de 1,0 a 3,0 m.

As alturas dos pilares desde o seu topo até a cota superior da sapata estão presentes na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Alturas dos pilares

Pilares	Altura
P1	17,0 m
P2	38,1 m
P3	50,6 m
P4	39,5 m
P5	30,9 m
P6	21,7 m

A ponte é fundada sob fundações diretas, sapatas, cuja secção é octogonal com eixos de dimensões, em planta, de 4,0 m e 8,0 m. Entre o fuste do pilar e a sapata de fundação existe um embasamento com secção em losango vazada, com espessura de parede de 0,70 m. Na Figura 3.3 está presente o perfil transversal dos pilares e dos embasamentos da ponte.

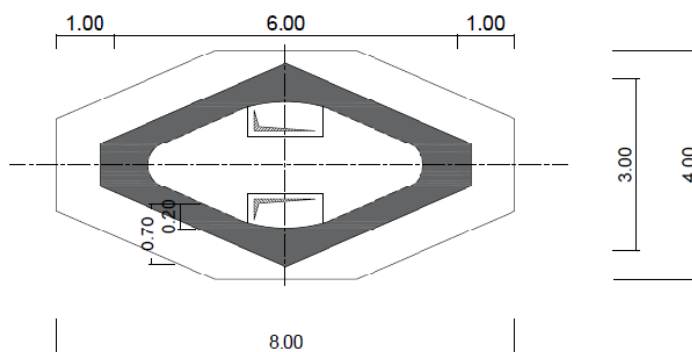


Figura 3.3: Perfil transversal dos pilares e embasamentos

Os encontros, aparentes e formados por contrafortes que suportam paredes em forma de harmónio, e os pilares P1 e P6 possuem aparelhos de apoio unidirecionais, sendo móveis no sentido longitudinal. Os restantes pilares apresentam aparelhos fixos nas duas direções. Para resistir à ação sísmica e ações horizontais o encontro da esquerda possui, também, quatro amortecedores viscosos com capacidade de mobilizar, no máximo, 410 kN.

3.2.1 Materiais

O betão adotado, tanto para a superestrutura como para a infraestrutura, foi o C25/30 e as armaduras ordinárias são em aço A400. As propriedades mais relevantes dos materiais estão apresentadas na Tabela 3.2 que se segue.

Tabela 3.2: Especificações dos Materiais

Betão C25/30		Aço A400	
f_{cd}	16,7 MPa	f_{yk}	400,0 MPa
f_{ck}	25,0 MPa	f_{yd}	348,0 MPa
f_{ctm}	2,2 MPa	E_s	200,0 GPa
$E_{c,28}$	30,5 GPa		

3.3 Observação estrutural da Ponte de São João das Areias

A observação estrutural da Ponte de São João das Areias foi realizada em duas fases distintas. Inicialmente, realizaram-se inspeções visuais ao nível do tabuleiro da ponte, aparelhos de apoio, travessas e fustes de pilares. Posteriormente, a ponte foi sujeita a inspeções subaquáticas. Neste caso, esteve em causa a avaliação da parte submersa dos fustes e embasamentos dos pilares, bem como as suas fundações.

Para completar a observação estrutural da ponte, desde Maio de 2015 que a mesma está sob observação contínua através de um sistema de monitorização. A instrumentação da ponte permite uma análise das rotações longitudinais e transversais dos diversos pilares, assim como dos deslocamentos experimentados nas juntas de dilatação junto aos encontros esquerdo e direito da ponte.

3.3.1 Inspeções visuais, principais anomalias e intervenções

A Ponte São João das Areias foi alvo de uma inspeção principal, a cargo da empresa OZ, e uma inspeção subaquática, feita pela empresa Neosub, ambas sob orientação da A2P, cujas conclusões se refletem numa degradação dos pilares e fundações devido a reações expansivas no betão.

A inspeção principal, realizada em Agosto de 2010, incidiu sobre a parte não submersa da estrutura da ponte e a análise foi feita, essencialmente, sobre o estado de conservação dos aparelhos de apoio dos pilares. Em alguns casos verificou-se o esmagamento da placa de chumbo dos aparelhos de apoio com consequências sobre as vigas do tabuleiro e carlingas sobre os pilares, observando-se a delaminação das mesmas devido ao encosto do betão na travessa do pilar.

Relativamente ao fuste dos pilares, estes apresentavam alguma fendilhação devido a reações expansivas, no entanto com abertura muito reduzida, não sendo, portanto, considerada uma anomalia de elevada preocupação.

A última inspeção subaquática foi conclusiva no que diz respeito ao estado de conservação dos embasamentos dos pilares, levando a uma intervenção mais profunda na estrutura.

As principais anomalias incidem, essencialmente, numa fendilhação excessiva na zona inferior do fuste e embasamento dos pilares P2 a P5, nas zonas submersíveis abaixo da cota máxima de exploração da albufeira.

Nos pilares mencionados é possível encontrar fissuração com padrão em malha. As fissuras verticais são em geral paralelas entre si e apresentam afastamentos variáveis, sendo em geral de 20cm a 30cm. As mais expressivas apresentam aberturas com valores entre os 3mm e os 5mm. As fissuras horizontais atravessam as fissuras verticais e em alguns casos atingem

Posto isto, o projeto de reparação e reforço dos pilares da ponte implica uma intervenção apenas nestas zonas, já que se considera que os danos não justificam uma substituição total dos pilares.

No caso dos pilares P1 e P6, por não se encontrarem na albufeira, optou-se por um encamisamento em betão armado com 0,14m de espessura no perímetro exterior ao embasamento, evitando-se o contacto da água com o betão dos pilares.

A solução prevista para os Pilares P2 a P4 consiste na implementação de um sistema de fundações indiretas em torno do pilar, com 6 estacas de diâmetro de 1,20m ligadas através de maciços de betão armado pré-esforçado ao fuste do pilar. Os maciços apresentam uma espessura de 2,0m, a sua face inferior está à cota de 119m e fazem a transmissão total de cargas até ao maciço granítico característico do terreno de fundação.

No que diz respeito ao pilar P5, o de menor altura, e mais próximo da margem, a intervenção consiste na adoção de microestacas, em substituição das estacas como no caso dos restantes pilares, ligadas ao pilar através de um maciço de betão armado pré-esforçado à mesma cota que os anteriores, mas com uma espessura de 1,50m.

Realizaram-se ainda, sondagens, mais especificamente oito sondagens, de prospeção geotécnica, da autoria da Geocontrolo, cujos resultados foram apresentados em Setembro de 2010. Desta inspeção foi possível concluir que as fundações da ponte se inserem em rocha granítica, classificável como medianamente alterada.

3.3.2 Sistema de Monitorização

O sistema de monitorização estrutural instalado na ponte S. João das Areias surge como parte de um contrato assinado pela EP, Estradas de Portugal, e o IC, Instituto da Construção da FEUP intitulado “*Monitorização Estrutural, IP3-Ponte sobre o rio Dão, em Foz Dão, EN234-Pontes do Criz I e II, EN234-6- Ponte de São João das Areias*”, pela qual o Núcleo de Estruturas do IC é responsável pela execução.

Este sistema surge como um eficiente acompanhamento do comportamento estrutural da obra antes e durante o processo de reabilitação e reforço, através da avaliação de determinadas grandezas consideradas de maior relevância. Prevê-se que com as leituras adquiridas seja possível criar cenários que simulem da forma mais realista possível o comportamento da estrutura. Deste modo, será possível determinar atempadamente possíveis anomalias, bem como, a avaliação dos seus efeitos na segurança da estrutura, conseguindo-se agir em conformidade com tal.

Para a sua concretização foi implementado um conjunto de sensores de base elétrica, ligados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados, o qual pode ser consultado e exportado via aplicação aberta.

3.3.2.1 Rede de Sensores

A configuração da rede de sensores é do tipo ramificada, o que implica que um único cabo elétrico alimenta vários sensores, mas todos do mesmo tipo. Assim, por cada secção instrumentada apenas existe um cabo. A única exceção ao referido está na secção do pilar P3 que para além, de sensores de rotação, apresenta também sensores de temperatura, existindo dois cabos elétricos de ligação ao sistema de aquisição.

Relativamente aos sensores de temperatura, em secções instrumentadas com vários equipamentos deste tipo foi necessário recorrer a caixas de derivação por forma a que as informações de todos os termómetros derivem num único cabo elétrico.

A Figura 3.6 mostra um exemplo do descrito.



Figura 3.6: Caixas de derivação de termómetros

Os cabos elétricos são cabos de 4, 8 e 12 fios multifilar de secção $0,5\text{mm}^2$ e foram conduzidos ao posto de observação pelo interior do passeio do lado de montante.

3.3.2.2 Grandezas de medição e sensores adotados

Para a avaliação da evolução do comportamento da estrutura, as grandezas consideradas como representativas e que serão medidas pelo sistema implementado são as rotações longitudinais e transversais no topo de cada um dos seis pilares da ponte, os deslocamentos observados nas juntas de dilatação dos Encontros Direito (ED) e esquerdo (EE), a temperatura numa secção do tabuleiro e pilar, e, finalmente, a temperatura ambiente.

- **Rotações no topo dos Pilares**

As rotações no topo dos pilares foram medidas através de inclinómetros uniaxiais do tipo LSOC-1-C (Figura 3.7). Todos os pilares foram instrumentados com dois dos equipamentos referidos, um que prevê a medição da rotação longitudinal e o outro a rotação transversal.



Figura 3.7: Inclinómetro uniaxial do tipo LSOC-1-C

A Figura 3.8 indica a convenção de sinais utilizada na leitura das rotações.

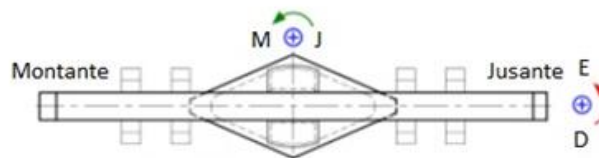


Figura 3.8: Convenção de sinais adotada para as rotações no topo dos pilares

- **Deslocamento de Juntas**

No que diz respeito ao deslocamento das juntas de dilatação, recorreu-se à utilização de transdutores indutivos de deslocamento, LVDT's do tipo DCRH2000C/371 (Figura 3.9) e foram

instalados nas secções junto dos encontros. Note-se que uma variação positiva de sinal indica um encurtamento do tabuleiro e, por conseguinte, uma abertura da junta.



Figura 3.9: LVDT do tipo DCRH2000C/371

- **Temperatura Ambiente e Temperatura no Betão**

Relativamente à temperatura, os seus efeitos são de elevada relevância no diz respeito ao comportamento das estruturas, sendo responsáveis não só, pelos deslocamentos nas juntas, devido ao encurtamento ou alargamento do tabuleiro da ponte, como também pelas rotações nos topos dos pilares. Para a contabilização desta grandeza foram instalados sensores de temperatura resistivos do tipo PT100 (Figura 3.10), cujo funcionamento se baseia no princípio da variação da resistência do metal com a temperatura, tal como descrito no capítulo anterior deste trabalho.

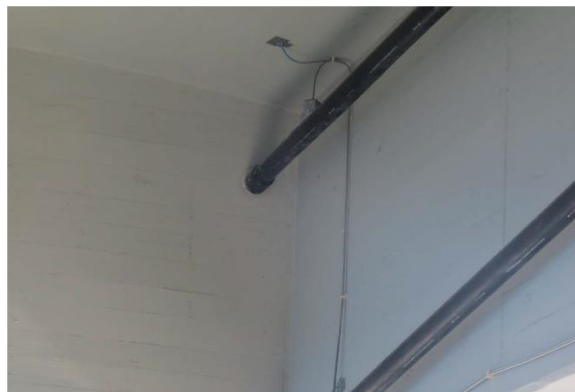


Figura 3.10: Termómetro do tipo PT100

Na Figura 3.11 utiliza-se o alçado da ponte para fazer referência às secções instrumentadas.

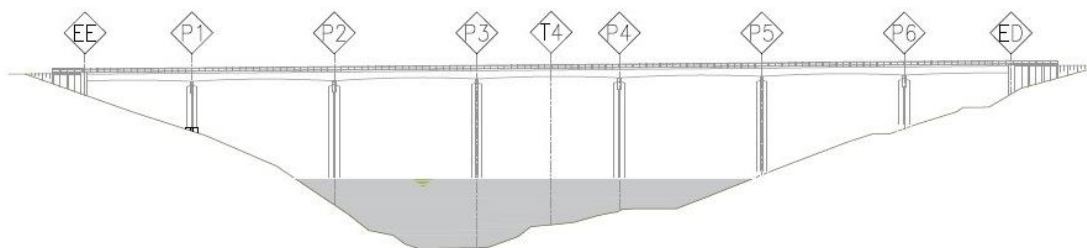


Figura 3.11: Localização esquemática das secções instrumentadas

Enquanto na Tabela 3.3 encontram-se resumidos os sensores utilizados por grandeza medida, tipo de sensor, localização e quantidade utilizada.

Tabela 3.3: Descrição da instrumentação aplicada

Grandeza Medida	Tipo de sensor	Localização	Quantidade
Rotações Longitudinais (RO_Lo)	Inclinómetros Uniaxiais LSOC-1-C	P1, P2, P3, P4, P5, P6	1
Rotações Transversais (RO_Tr)		P1, P2, P3, P4, P5, P6	1
Deslocamentos (DJ)	LVDT's DCRH2000C/371	EE, ED	1
Temperatura (ST)	Detetores de Temperatura Resistivos PT100	T4	4
		T4	1
		P3	4
		P3	1

3.3.2.3 Sistema de Aquisição e rede de comunicação

O sistema de aquisição e de armazenamento dos sinais provenientes dos sensores foi concentrado num único posto de observação, instalado no interior do Encontro Esquerdo. O sistema assenta na utilização de um DT80-3 e CEM20 da *DataTaker* e encontra-se alojado num armário de proteção, tal como se pode observar na Figura 3.12.



Figura 3.12: Posto de observação

O sistema encontra-se ligado a um *router* com uma entrada para uma *pen* em banda larga da rede *TMN*. A comunicação de dados é conseguida através de um protocolo de *Ethernet*, capaz de encaminhar os dados para o servidor da *NewMensus*, onde se encontra a base de dados. O website deste servidor permite a visualização dos dados recolhidos e a sua exportação em ficheiro *CSV*.

Os equipamentos instalados possuem programas de aquisição de dados, que podem ser controlados remota ou localmente e encontram-se programados para a aquisição de informação por minuto em regime contínuo.

3.3.3 Resultados da Monitorização

Neste ponto do trabalho apresentam-se os resultados da monitorização, no período de um ano compreendido entre Maio de 2016 e Maio de 2017. Serão discutidos, de uma forma mais geral, os resultados obtidos, sobre os quais se farão algumas considerações sobre o seu andamento e anomalias mais evidentes.

Cobre-se os registos obtidos em cada seção instrumentada, no período de observação, para todas as grandezas de medição. Desde já se assinalam algumas interrupções nas medições, visíveis nos gráficos, que podem ter sido motivadas por falhas na alimentação do sistema.

Na Figura 3.13 é possível consultar o andamento da temperatura ambiente, durante o ano de observação. Nas Figuras 3.14 e 3.15 apresenta-se as medições efetuadas pelos termômetros instalados no tramo T4 do tabuleiro e no pilar P3. Para auxiliar a interpretação dos efeitos da temperatura nos inclinômetros apresenta-se na Figura 3.16 a evolução das temperaturas junto a um sensor desse tipo no Pilar P3.

Relativamente à nomenclatura utilizada, note-se que para os sensores localizados sobre os pilares ou sobre os tramos do tabuleiro utilizou-se, respectivamente, Pi e Ti, em que i representa o número da seção (ver Figura 3.11, ponto 3.3.2.2). As siglas M, J, E e D permitem distinguir sensores instalados a montante ou a jusante, do lado esquerdo ou direito. Enquanto, para o caso da medição no tabuleiro da ponte, as siglas L e V, indicam sensores instalados na laje ou nas vigas, respectivamente. Já relativamente à temperatura ambiente utilizou-se “amb” e para indicar as variações térmicas junto ao inclinómetro, recorreu-se a “inc”.

Como se pode constatar pelos gráficos seguintes, todos apresentam o mesmo andamento, evidenciando o efeito sazonal da temperatura associado às suas variações anuais. Através dos gráficos é possível distinguir os meses quentes (Maio a Setembro) e meses frios (Outubro a Março). Para além disso, através dos diferentes picos visíveis, é possível verificar a existência de flutuações de temperatura associadas aos ciclos diários.

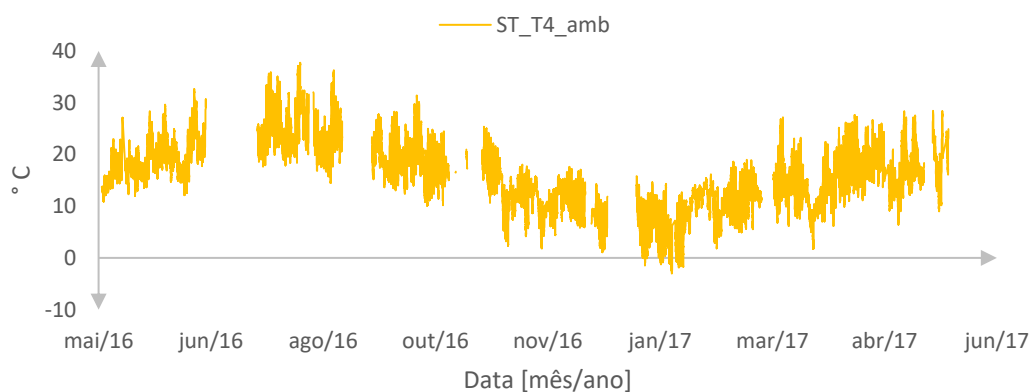


Figura 3.13: Temperatura ambiente

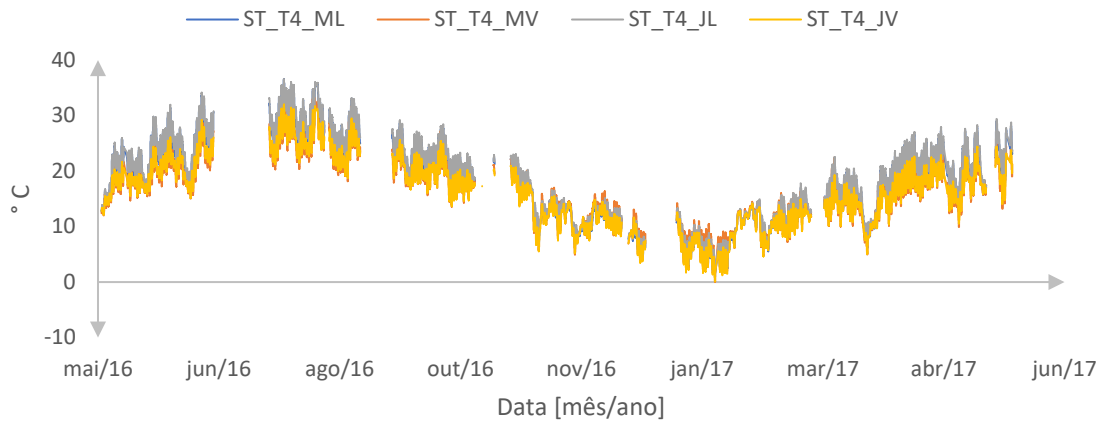


Figura 3.14: Temperatura no tabuleiro

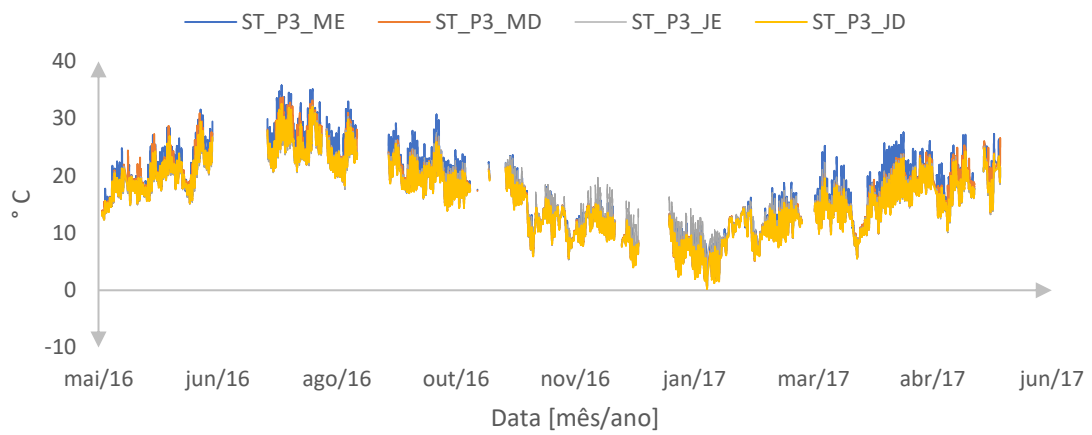


Figura 3.15: Temperatura no pilar P3

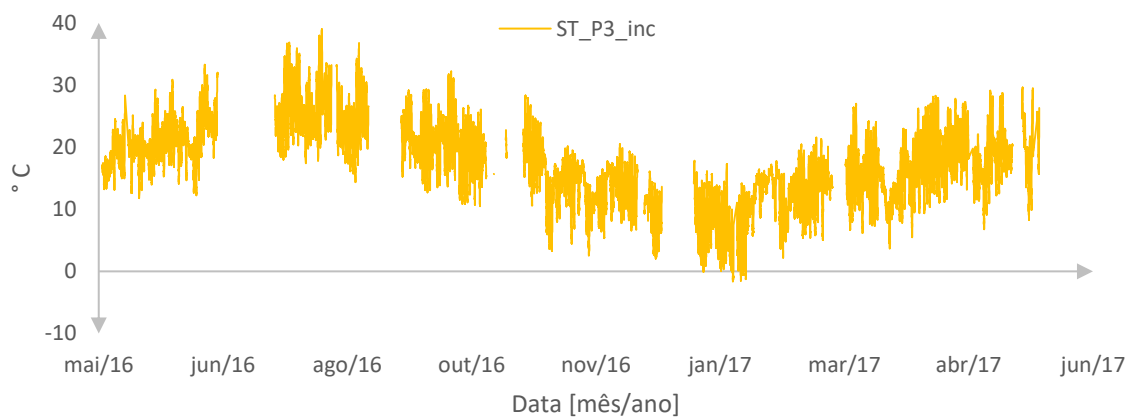


Figura 3.16: Temperatura junto ao inclinômetro instalado em P3

Na Figura 3.17 apresenta-se os deslocamentos verificados nas juntas de dilatação junto dos encontros da ponte. Repare-se que estes apresentam, para além de variações diárias, uma clara variação sazonal associada à lenta variação da temperatura, durante o ano. Veja-se que, como seria de esperar, durante os meses quentes, os deslocamentos nas juntas apresentam uma variação negativa, o que significa que a junta fechou, verificando-se um alargamento do tabuleiro. Pelo contrário nos meses frios os valores são positivos, indicando uma abertura da junta e consequente encurtamento do tabuleiro.

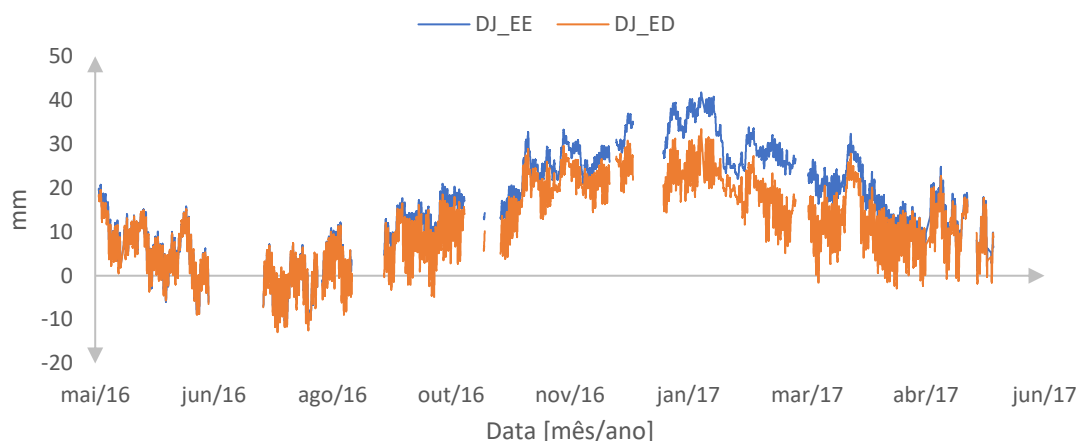


Figura 3.17: Deslocamentos das juntas de dilatação

Relativamente aos resultados apresentados para as rotações, (Figura 3.18 à Figura 3.23) algumas particularidades são visíveis à primeira vista. As rotações nos pilares tendem a ter variações lentas ao longo do ano, não muito perceptíveis em todos os pilares, mas atente-se nos resultados relativos aos pilares P2 e P5. Como seria de esperar no pilar P3 e P4, por serem os mais centrais, as flutuações não são tão significativas.

Em todos os gráficos são visíveis as flutuações diárias, rotações rápidas associadas aos ciclos diários de temperatura.

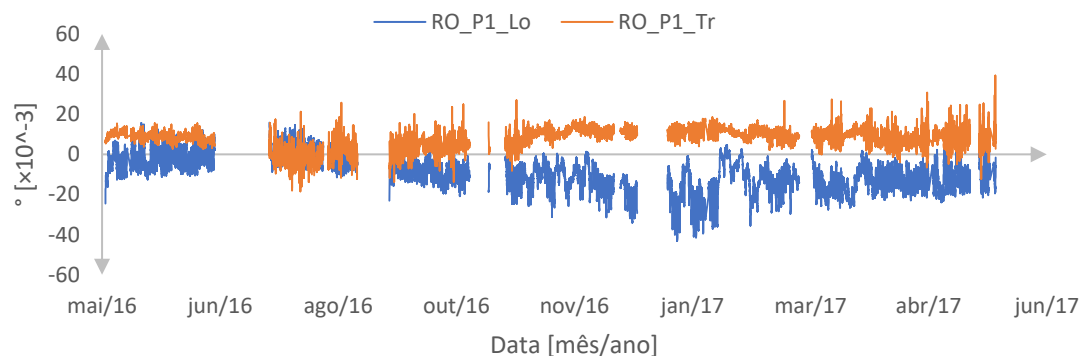


Figura 3.18: Rotações pilar P1

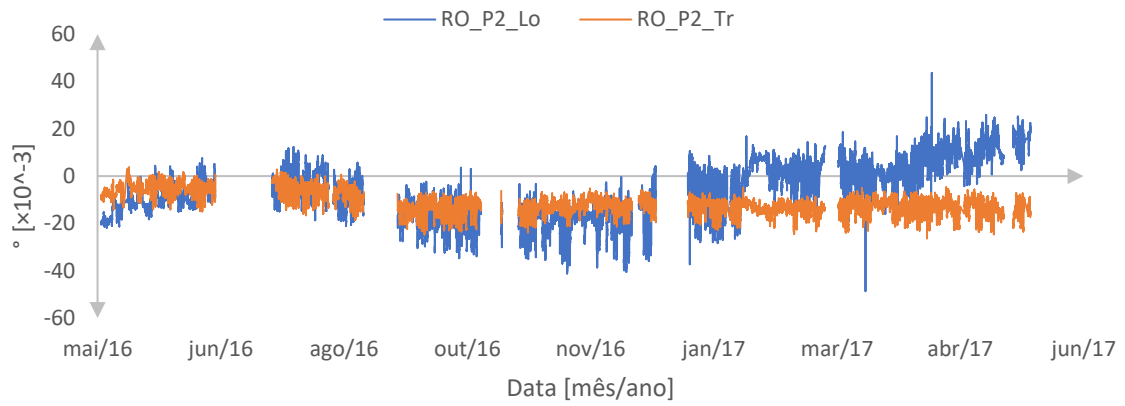


Figura 3.19: Rotações pilar P2

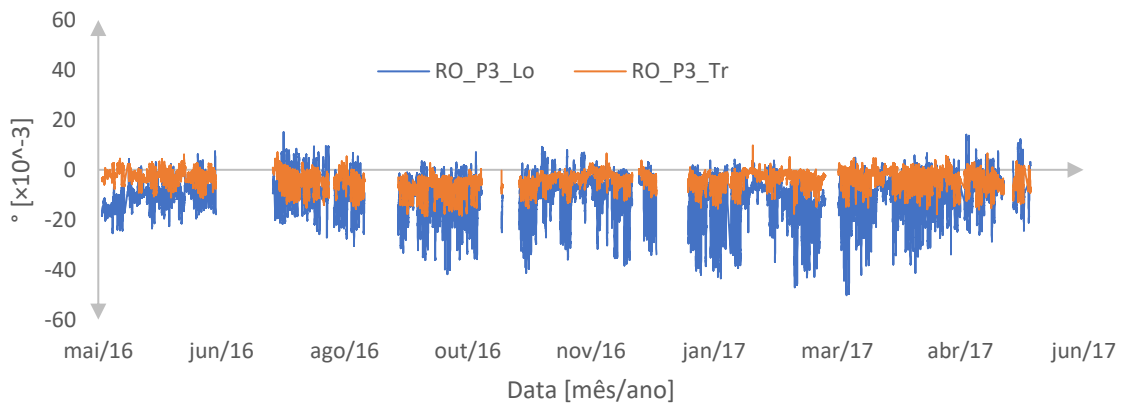


Figura 3.20: Rotações pilar P3

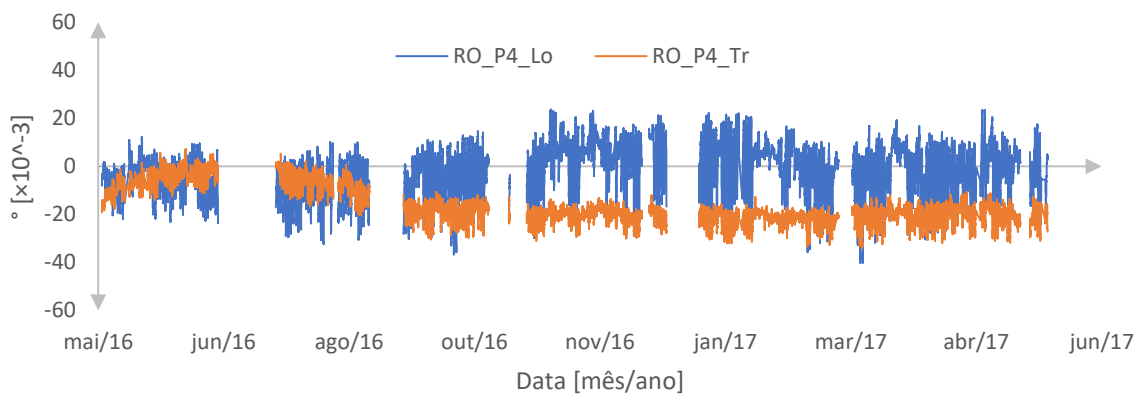


Figura 3.21: Rotações pilar P4

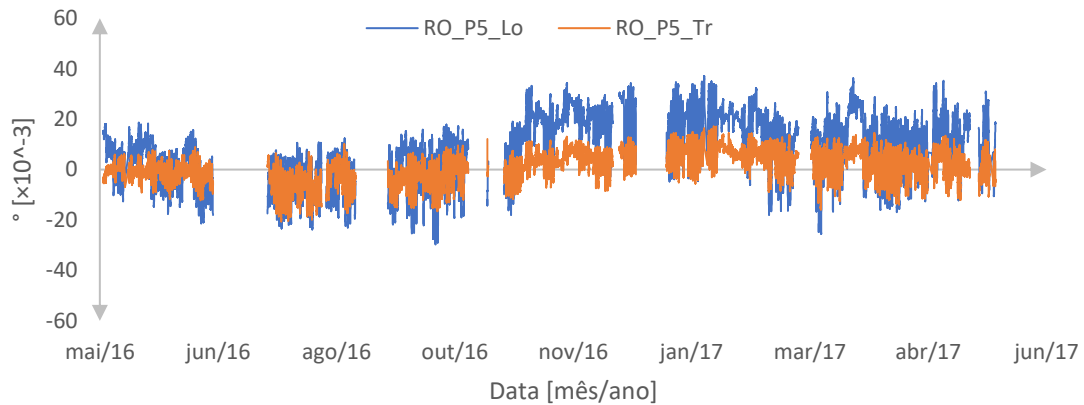


Figura 3.22: Rotações pilar P5

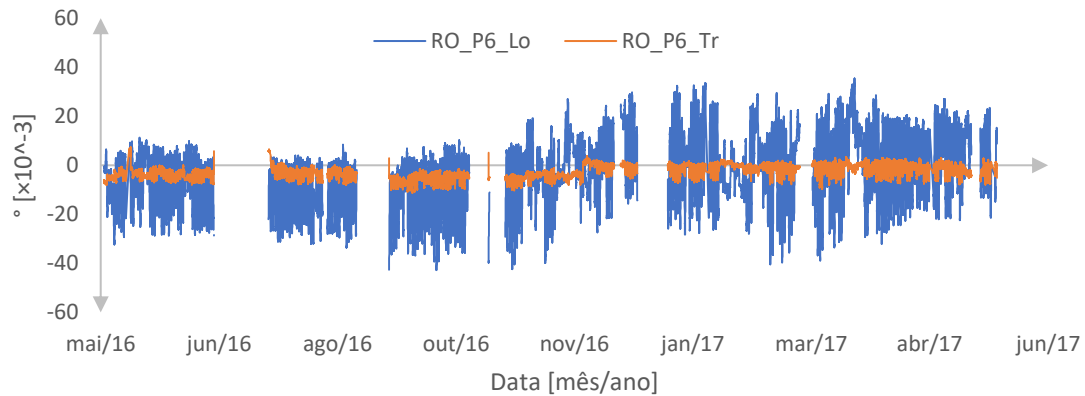


Figura 3.23: Rotações pilar P6

3.4 Considerações Finais

Devido às debilidades que a ponte de São João das Areias apresenta nas suas fundações e embasamento dos pilares tornou-se necessário proceder à sua instrumentalização. A observação da estrutura através do sistema aplicado permite o controlo permanente de grandezas como os deslocamentos de juntas e as rotações nos topos dos pilares.

Com os dados relativos a um ano de observação, praticamente contínuos, é possível aferir alguns comportamentos tendenciais da estrutura. Desde já, é perceptível que a resposta da estrutura está fortemente associada às variações da temperatura que se sentem no local.

As lentas flutuações nos deslocamentos de juntas e nas rotações sentidas nos topos dos pilares estão fortemente relacionadas com as variações sazonais de temperatura observadas no período de observação. No caso de estruturas como pontes, estas variações estão associadas essencialmente à componente uniforme da variação da temperatura e à combinação dos seus efeitos nos pilares e tabuleiro. (Reis, 2001)

Através dos gráficos apresentados é possível verificar picos representativos dos ciclos diários de variações de temperatura ao qual se associam pequenas deformações. Neste caso, o efeito não só, da insolação em certas partes da estrutura como a componente diferencial da variação diária da temperatura produzem deslocamentos e rotações na superestrutura que se apresentam como reversíveis.

Conclui-se, assim, que a perfeita aferição dos gradientes térmicos nos diferentes elementos da estrutura é um ponto crucial na caracterização do comportamento da mesma, pelo que no capítulo seguinte, dedicado ao estudo mais intensivo desse mesmo comportamento, este facto será analisado com mais rigor.

4. O Comportamento estrutural da Ponte de São João das Areias

4.1 Considerações iniciais

Como se pode verificar pelo capítulo anterior, a resposta da estrutura está fortemente relacionada com as variações, tanto sazonal como diária, da temperatura média sentida pela estrutura. A sua influência nas restantes grandezas alvo de medição pelo sistema de monitorização terá, desta forma, de ser criteriosamente discutida.

Neste contexto, o presente capítulo começa por apresentar os resultados obtidos pelo sistema de monitorização instalado na ponte, para o caso particular dos pilares P2 e P5. Para as diferentes grandezas será discutida a sua evolução anual e diária, separadamente.

Como ferramenta de auxílio à interpretação do comportamento estrutural da ponte, recorre-se a um modelo de cálculo da estrutura, devidamente ajustado e calibrado para que os resultados obtidos representem o mais próximo possível o comportamento real da ponte.

Para o presente caso de estudo, a verificação e calibração do modelo adotado será feita através da comparação entre as medições efetuadas pelo sistema sensorial instalado na ponte e os resultados obtidos através da análise numérica da estrutura.

A avaliação e a compreensão do comportamento da Ponte de São João das Areias perante as debilidades que apresenta na base dos pilares devidas à sua intensa deterioração, é fundamental no sentido de uma correta avaliação da segurança estrutural.

Neste sentido, numa perspetiva de atempar qualquer ocorrência anormal, a parte final do capítulo dedica-se ao estudo dos efeitos de eventuais cenários de dano na estrutura. Por forma a representar um dano associado a uma anomalia na base dos pilares recorre-se ao modelo e impõe-se uma deformação, no caso uma rotação na base, e avaliam-se as suas consequências e repercussões na globalidade da estrutura.

Finalmente, o estudo incide sobre um método de vigilância e alerta comportamental. Foi desenvolvido um modelo estatístico de regressão linear cuja principal base é a compensação dos efeitos ambientais sobre as grandezas caracterizadoras do comportamento da estrutura.

Foram definidos limites de alerta e estudadas as suas implicações, tanto a nível de deformações como de esforços resultantes.

4.2 Discussão de resultados

A resposta estrutural de obras de arte às ações ambientais é comandada, essencialmente, pela ação da temperatura. Esta ação, quando considerada na avaliação comportamental de estruturas é, por norma, decomposta em duas parcelas, variações uniformes e variações diferenciais de temperatura. No caso particular de estruturas como pontes, sobretudo no que diz respeito às suas superestruturas, as variações uniformes de temperatura estão relacionadas com variações sazonais, enquanto flutuações térmicas diárias apresentam componentes uniformes e diferenciais (Reis, 2001).

Neste contexto, inicialmente, será feita a análise sobre as variações sazonais de temperatura sentidas no betão do tabuleiro e dos pilares e serão analisadas as suas consequências sobre as grandezas que permitem caracterizar o comportamento da estrutura.

Posteriormente a análise passa pela avaliação das flutuações diárias de temperatura, mais uma vez no tabuleiro e nos pilares, e a resposta da estrutura para esta ação com análise da evolução das restantes grandezas.

4.2.1 Variação sazonal

4.2.1.1 Variações térmicas

Para a análise dos efeitos da variação sazonal de temperatura é necessário conhecer o comportamento da estrutura para a atuação dessa mesma ação. Note-se que, tal como referido anteriormente, a estrutura apresenta nos dois encontros e nos pilares P1 e P6, apoios móveis, com liberdade de translação segundo a direção longitudinal da ponte, sendo os restantes pilares fixos ao tabuleiro.

Tal como numa peça linear, uma variação uniforme de temperatura conduz a um deslocamento de apoios extremos, coincidente com o alongamento/encurtamento da peça e proporcional à distância ao respetivo centro de rigidez da estrutura. Entenda-se centro de rigidez como o ponto de deformação/deslocamento nulo da estrutura, dado pela expressão 4.1.

$$x_{cri} = \frac{\sum kix_i}{\sum ki} \quad (4.1)$$

Em que k_i indica a rigidez de um elemento e x_i a posição do mesmo em relação ao início do referencial.

Para o presente caso de estudo, tomando como origem do referencial a extremidade esquerda tem-se que $x_{cri} \simeq 150 \text{ m}$. Note-se que, este ponto se encontra muito próximo do centro de gravidade ($x_{grav} = 130,0 \text{ m}$) do tabuleiro da ponte, o que seria de esperar graças à quase simetria que a ponte apresenta.

Posto isto, é agora possível verificar os sentidos adotados como positivos ou negativos para as diferentes grandezas alvo de medição. A Figura 4.1 indica a deformada da ponte para um abaixamento da temperatura no betão, verificando-se um encurtamento do tabuleiro, e os respetivos sentidos das rotações nos diferentes pilares, tendo em conta a convenção de sinais adotada para os sensores (Figura 3.8, Ponto 3.3.2.2).

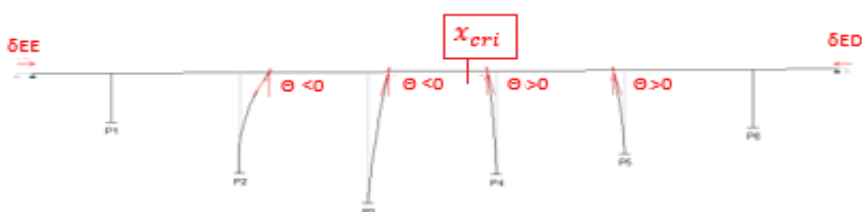


Figura 4.1: Convenção de sinais para a rotação no topo dos pilares

- **Temperatura no tabuleiro**

Para a medição da temperatura no tabuleiro, foram instalados sensores de temperatura em quatro pontos distintos da seção de meio vão do tramo T4. A média dos resultados obtidos por estes está exposta graficamente na Figura 4.2, com a correspondente linha de tendência.

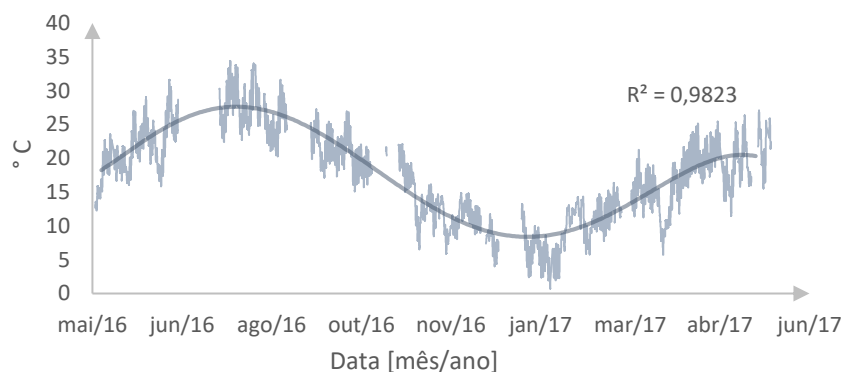


Figura 4.2: Temperatura média no tabuleiro

Note-se que, no tabuleiro, a temperatura média obtida para os meses quentes e para os meses frios leva a que a ponte experimente uma variação uniforme anual de temperatura perto dos $\pm 12,5^{\circ}\text{C}$.

- **Temperatura no Pilar**

Relativamente à temperatura média no pilar, mais uma vez, foi conseguida através do valor médio das observações adquiridas por quatro sensores instalados. Os respetivos resultados podem ser consultados no gráfico da Figura 4.3.

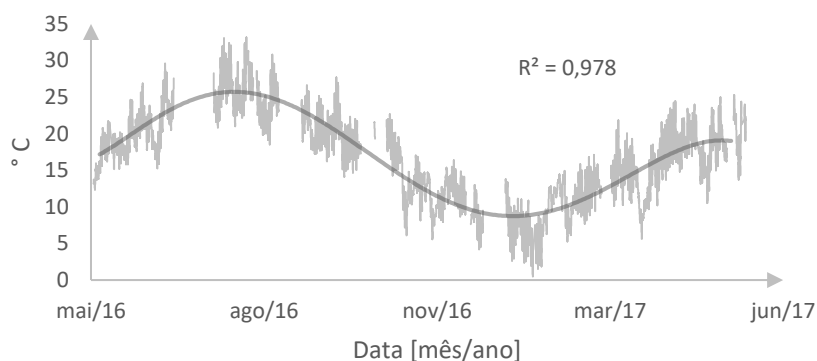


Figura 4.3: Temperatura média no pilar

As variações de temperatura para o caso do pilar são mais reduzidas comparativamente com os resultados encontrados para o tabuleiro. Neste caso, o pilar apresenta uma variação uniforme de temperatura da ordem dos $\pm 10^{\circ}\text{C}$. No entanto note-se que, em termos de rotações e deslocamentos de juntas no tabuleiro, uma variação uniforme de temperatura no pilar não introduz alterações. A mesma está associada apenas a alongamentos/encurtamentos da peça, ou, quando impedidos, a esforços normais.

4.2.1.2 Deslocamentos de junta

Relativamente ao comportamento das juntas de dilatação junto dos encontros esquerdo e direito, os resultados da monitorização registam que o seu andamento segue a representação exposta no gráfico da Figura 4.4 e na Figura 4.5, respetivamente.

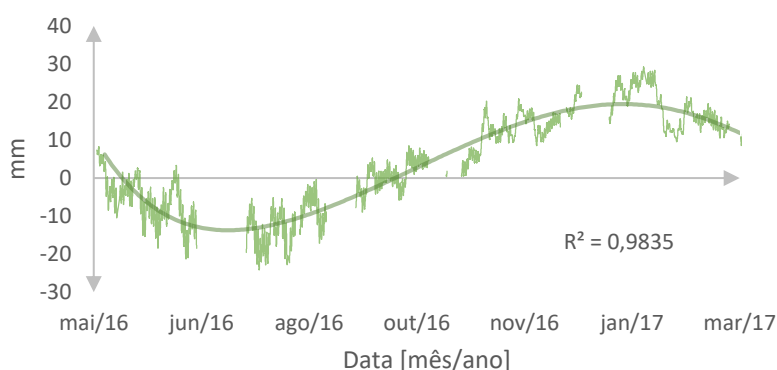


Figura 4.4: Deslocamentos na junta da esquerda

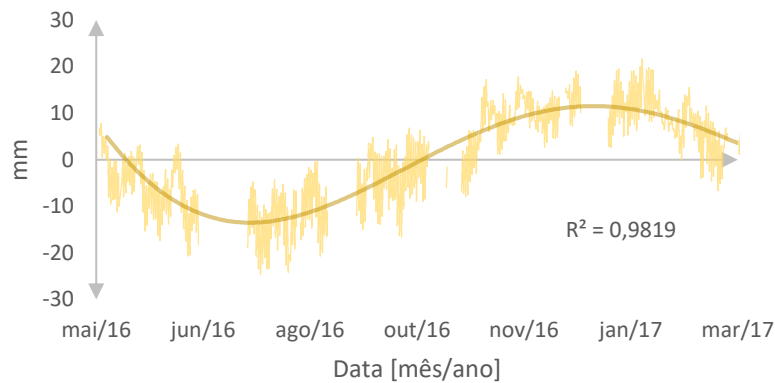


Figura 4.5: Deslocamentos na junta da direita

Relativamente ao andamento das leituras, verifica-se, pelos gráficos, o esperado. Para os meses quentes em que ocorre um aumento da temperatura média do tabuleiro, os sensores de deslocamento registaram variações negativas nas leituras, o que coincide com um fecho de junta e, portanto, alongamento do tabuleiro. Verificando-se, precisamente o contrário, quando as leituras foram feitas para os meses frios.

Uma análise qualitativa, leva a que para a junta do encontro da esquerda se tenha uma variação de deslocamento relativo de aproximadamente 19 mm, enquanto na junta do encontro da direita o valor ultrapassa ligeiramente os 13 mm.

Os deslocamentos obtidos na junta da esquerda são superiores aos obtidos para a da direita graças à posição do centro de rigidez da estrutura.

4.2.1.3 Rotações nos pilares

As rotações longitudinais medidas nos pilares P2 e P5 durante o tempo de observação podem ser consultadas nas Figura 4.6 e Figura 4.7, respectivamente.

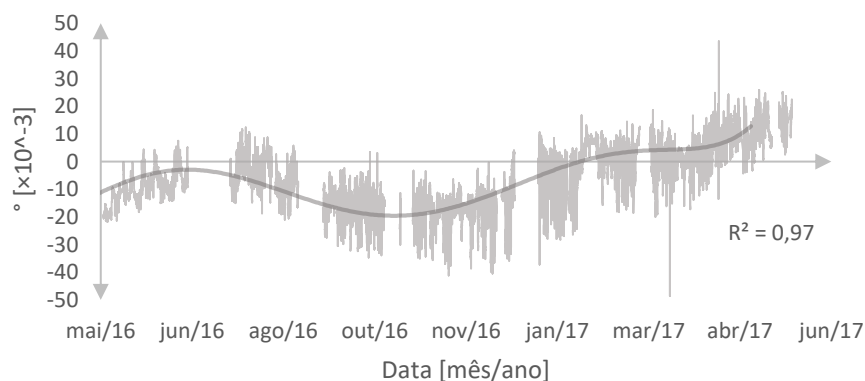


Figura 4.6: Rotações Longitudinais no pilar P2

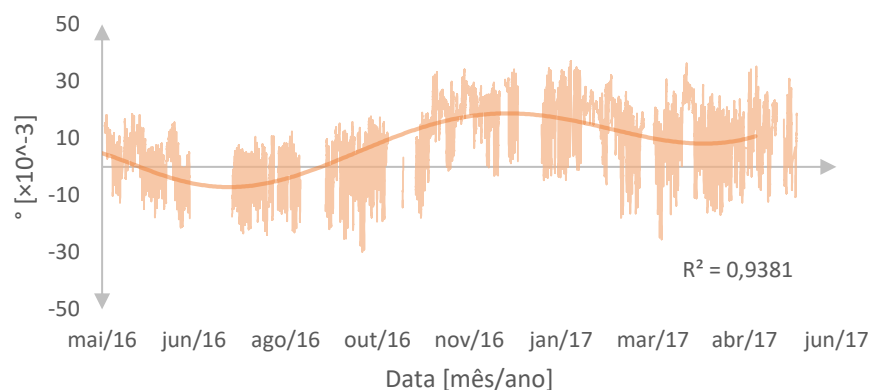


Figura 4.7: Rotações Longitudinais no pilar P5

Desde já, uma primeira apreciação dos gráficos anteriores permite destacar o sentido oposto do andamento dos dois pilares, justificado por se encontrarem em sentidos opostos do centro de rigidez da estrutura. Relacionando este gráfico com o correspondente à temperatura no tabuleiro, tem-se que para os meses frios, quando a temperatura sofre uma variação negativa, o tabuleiro sofre um encurtamento. Tendo em conta os sentidos das rotações representados na Figura 4.1, repare-se que as leituras estão conforme o exposto.

A variação das rotações médias longitudinais assume valores da ordem dos $30,5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$ e $24,5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$ para os pilares P2 e P5, respectivamente.

4.2.2 Variações diárias

4.2.2.1 Variações térmicas

Relativamente às variações térmicas diárias, estas podem ser divididas, simplificada, em duas parcelas, parcela uniforme, ΔT_u , e parcela diferencial, ΔT_d , e dependem de vários fatores. Entre estes fatores destacam-se a orientação e exposição da estrutura ao sol, a radiação solar, a temperatura ambiente, o tipo de material e forma da seção transversal, o revestimento do tabuleiro, ou ainda, o grau de nebulosidade e velocidade do vento.

As variações diferenciais podem ocorrer nas diversas direções, num mesmo elemento estrutural, como uma viga, laje ou pilar, ou entre elementos de uma estrutura.

Para o caso desta dissertação, no que diz respeito ao tabuleiro, interessa analisar gradientes diferenciais de temperatura no sentido transversal aos quais se espera que provoquem uma curvatura no próprio plano levando a deslocamentos relativos entre extremos de uma mesma junta e a rotações transversais no topo dos diferentes pilares. Já no que respeita aos pilares, é

de todo o interesse analisar gradientes nas duas direções do plano da seção transversal, numa tentativa de quantificar rotações tanto transversais como longitudinais.

No gráfico da Figura 4.8, podem ser consultadas as leituras efetuadas no dia 23/01/2017 para temperaturas médias ambiente, no betão do tabuleiro e no betão do pilar.

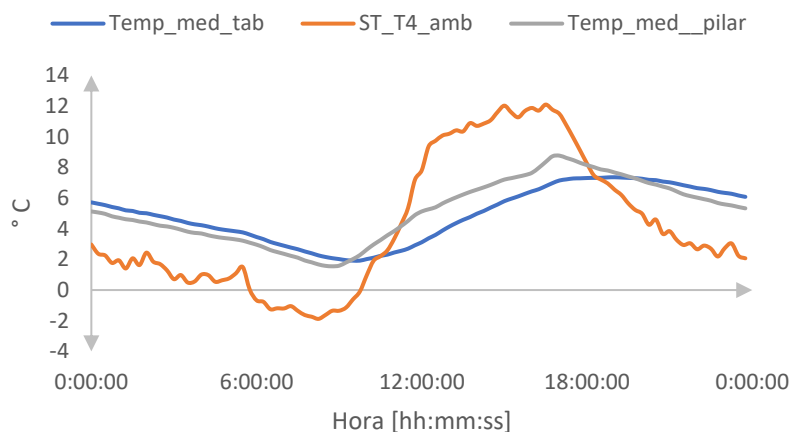


Figura 4.8: Temperatura média ambiente, no tabuleiro (tramo T4) e pilar (pilar P3)

Quando comparadas as variações térmicas diárias no betão do tabuleiro e do pilar com a temperatura ambiente, é notório que o abaixamento ou aquecimento da temperatura média no betão, que se verifica nas duas seções, não é suficiente para que seja atingida a temperatura ambiente. A diferença entre estas chega a atingir 4°C, tanto no início da manhã entre as 7:00h e as 9:00h, como da parte da tarde, entre as 13:00h e as 17:00h.

A temperatura ambiente verificada no dia em questão apresenta valores de -2°C por volta das 9 horas e um máximo de 12°C entre as 14 e as 17 horas. Para a temperatura média diária no tabuleiro tem-se que o mínimo e o máximo ocorrem às 9 horas e 30 min e às 17 horas, com valores, aproximadamente, de 2°C e 8°C, respectivamente. Já no que respeita ao pilar, a temperatura mínima de 2°C dá-se por volta das 9 horas, e a máxima, que ultrapassa ligeiramente os 8°C acontece por volta das 17h.

Esta diferença juntamente com o desfasamento no tempo entre os picos das leituras, pode ser justificada atendendo a que, por um lado os locais onde os sensores foram instalados são na face inferior do tabuleiro e na parte interior das vigas, fazendo com que os mesmos estejam protegidos, não tendo incidência direta do sol. Por outro lado, os mesmos foram instalados à superfície do betão e não no interior.

Ainda assim, com o gráfico exposto anteriormente, torna-se impossível ter a perceção se, transversalmente, o efeito da insolação e dos restantes fatores ao longo do dia é significativo nas leituras efetuadas pelos sensores.

Neste sentido, é de todo o interesse uma análise separada às leituras dos diferentes sensores. Começando pelo caso do tabuleiro, de acordo com o projeto de monitorização, os quatro sensores foram instalados no tramo T4 do tabuleiro segundo as posições expostas na Figura 4.9 seguinte.



Figura 4.9: Posição dos sensores no tabuleiro, tramo T4

Analisando, agora, o gráfico correspondente ao dia de observação, presente na Figura 4.10, repare-se que os sensores registam temperaturas muito próximas.

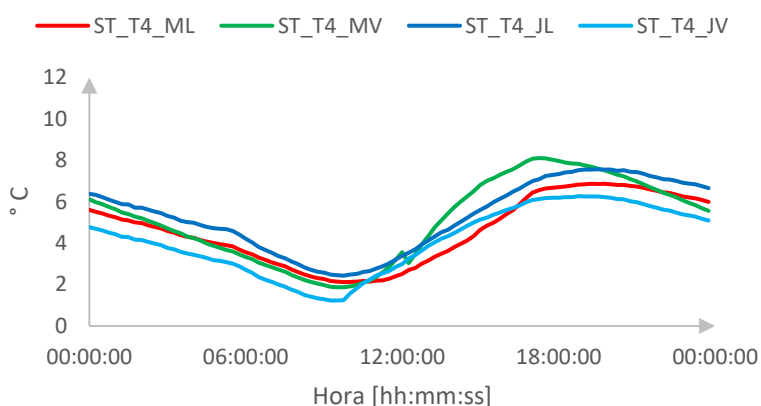


Figura 4.10: Leituras dos sensores instalados no tabuleiro, tramo T4

Sobre a orientação da ponte, a mesma foi construída no sentido Norte-Sul, sendo a norte, Tábua e São João das Areias a sul, pelo que a posição do sol, às 12:00h, se encontra sobre o encontro da esquerda. Para além disso, tal como referido anteriormente, o local de instalação dos sensores não é a mais indicada para captar estas variações.

Poder-se-ia analisar o efeito das variações diferenciais de temperatura através dos deslocamentos relativos entre extremos transversais de uma junta. No entanto, segundo o projeto de monitorização, os LVDT's foram instalados apenas do lado de montante não existindo leituras do lado de jusante, o que impossibilita a análise.

Por estas razões, e confirmando com o gráfico exposto, não é possível, para já, tirar conclusões sobre o gradiente térmico, gerado no sentido transversal, no que diz respeito ao tabuleiro.

No entanto repare-se que, durante o dia de observação os sensores do tabuleiro marcam uma diferença de temperatura de cerca de 6°C entre a manhã e o fim da tarde, temperatura esta que será mais tarde aplicada no modelo como uma parcela uniforme e provocará deslocamentos nas juntas e rotações longitudinais nos pilares.

Passando a análise, agora, sobre os pilares, nomeadamente o pilar instrumentado que corresponde, neste caso, ao pilar P3, seguindo o projeto de monitorização, os quatro sensores foram instalados de acordo com o presente na Figura 4.11, em baixo.

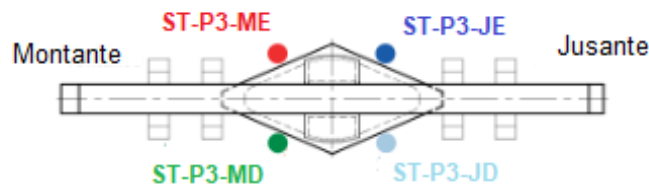


Figura 4.11: Posição dos sensores no pilar P3

Atente-se no gráfico da Figura 4.12 onde estão presentes as leituras efetuadas por esses mesmos sensores.

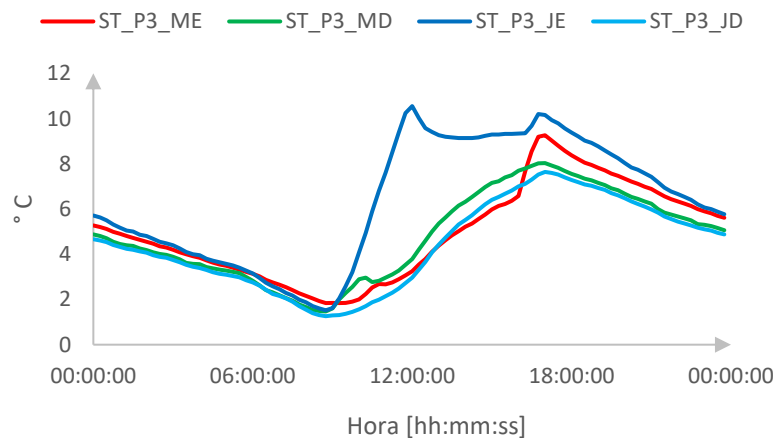


Figura 4.12: Leituras dos sensores instalados no pilar P3

Note-se que se verifica, que para um sensor em particular, as leituras são bem distintas. No sensor aplicado a jusante do lado esquerdo da ponte, as temperaturas apresentam uma variação superior, em aproximadamente 3°C, das leituras efetuadas pelos restantes.

No caso do pilar, contrariamente ao sucedido para o tabuleiro, é possível encontrar um gradiente térmico, tanto no sentido longitudinal como no sentido transversal, já que o pilar tem a forma de um hexágono e só uma das faces apresenta variações térmicas significativas.

4.2.2.2 Deslocamentos de junta

Nas Figura 4.13 e Figura 4.14 é possível consultar as flutuações diárias, registadas pela instrumentação, para os deslocamentos e para a temperatura média registada no betão do tabuleiro.

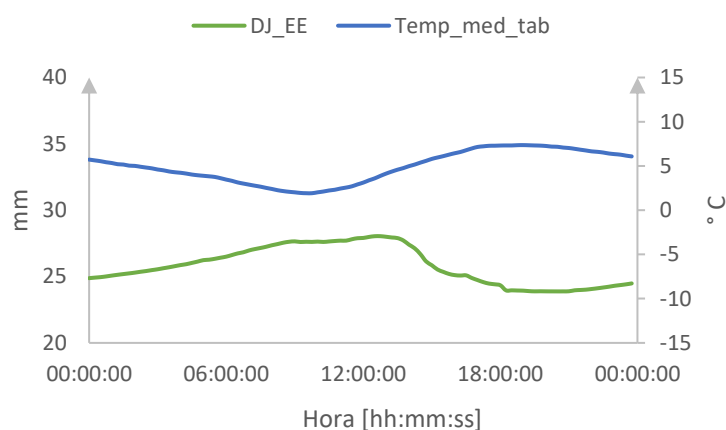


Figura 4.13: Deslocamentos na junta de dilatação do encontro esquerdo e temperatura média no tabuleiro

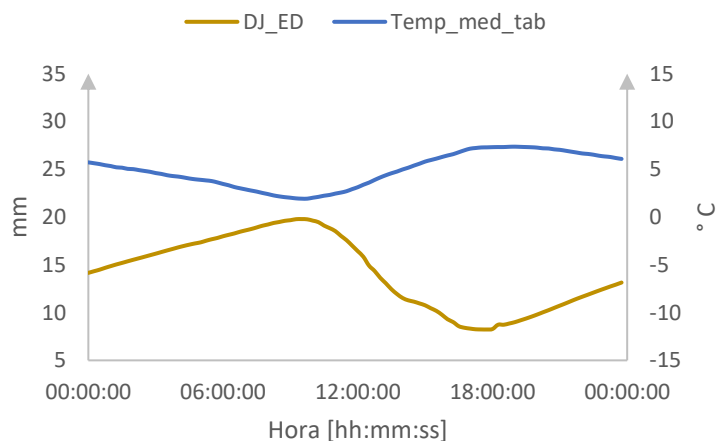


Figura 4.14: Deslocamentos na junta de dilatação do encontro direito e temperatura média no tabuleiro

Segundo as séries presentes nos gráficos, durante o dia 23/01/2017, registou-se um deslocamento de cerca de 5mm para a junta posicionada à esquerda e 11mm para a junta da direita.

Contrariamente ao que seria de esperar e ao referido no ponto 4.2.1.1., a junta da direita apresenta uma variação superior à da junta da esquerda. Na verdade, para flutuações diárias,

os aparelhos de apoio, teoricamente móveis, introduzidos nos pilares P1 e P6, possuem um ligeiro atrito que caso não seja vencido, pode levar a uma alteração do modo de funcionamento dos apoios do tabuleiro da ponte.

Para o caso, por haver uma alteração dos valores dos deslocamentos relativos das juntas indica que a força de atrito nos apoios P1 e/ou P6 não foi vencida, provocando uma alteração da posição do centro de rigidez, puxando-o mais para esquerda. Esta hipótese será testada mais á frente, aquando a análise do modelo de cálculo automático.

4.2.2.3 Rotações nos pilares

Tal como referido anteriormente, durante o dia, à medida que a temperatura média diminui, o tabuleiro da ponte tende a reduzir de comprimento, relativamente à posição inicial. Em consequência desta diminuição, tem-se que, para pilares fixos ao tabuleiro, estes vão sofrer rotações no seu topo cujo sentido está relacionado com a sua posição em relação ao centro de rigidez da estrutura.

Para os dois pilares em estudo, P2, à esquerda do centro rígido, e P5, posicionado à direita do mesmo, este comportamento não passa despercebido. Observe-se os gráficos em baixo, nas Figura 4.15 e Figura 4.16, para as rotações longitudinais nos pilares P2 e P5, respectivamente.

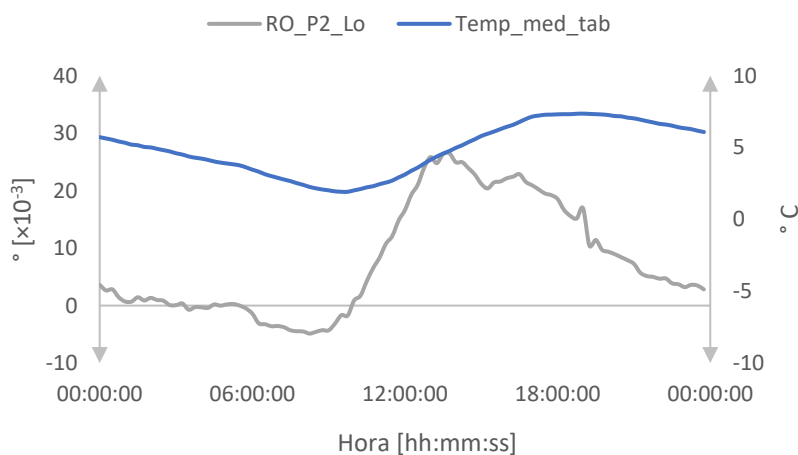


Figura 4.15: Rotações Longitudinais no pilar P2

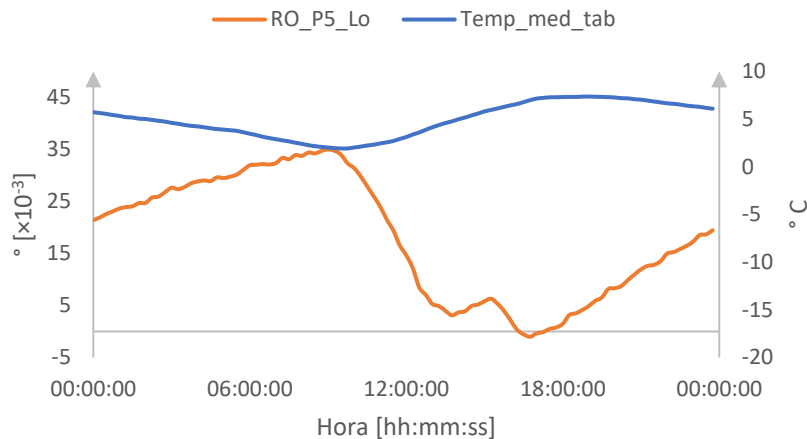


Figura 4.16: Rotações Longitudinais no pilar P5

Como seria de esperar, para uma variação negativa da temperatura média no tabuleiro, a série de rotações representada para o pilar P2 exibe um declive também negativo, enquanto o pilar P5 apresenta, para a mesma situação, um declive positivo.

Os gráficos das figuras acima permitem concluir que o pilar P2, no dia 23/01/2017 sofreu uma rotação longitudinal no seu topo de $30 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$ e o pilar P5 uma rotação de $35 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$.

Note-se, que as rotações longitudinais presentes nos gráficos anteriores são devidas, não só a uma variação uniforme de temperatura no tabuleiro, como também à parcela diferencial da variação de temperatura nos pilares. Tal como se referiu no ponto 4.2.2.1., uma das faces do pilar apresenta variações térmicas, ao longo do dia, mais significativas comparativamente com as restantes, criando assim um gradiente térmico que provocará, no topo dos pilares, uma rotação tanto longitudinal como transversal.

Os gráficos para as rotações transversais, ao longo de um dia, para os pilares P2 e P5 podem ser consultados nas Figura 4.17 e Figura 4.18, respectivamente.

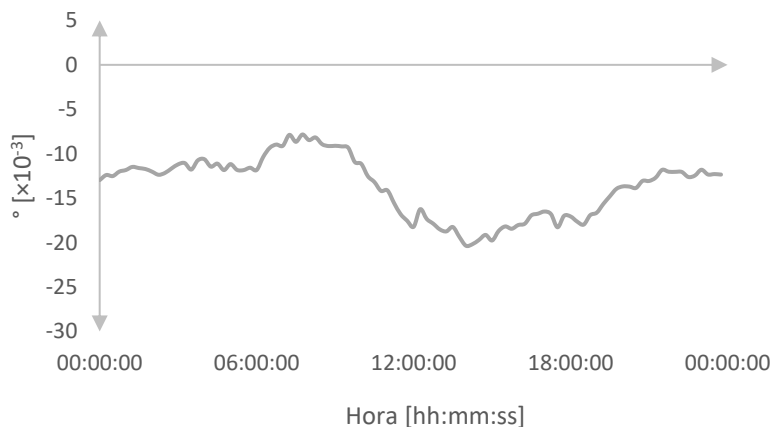


Figura 4.17: Rotações transversais no pilar P2

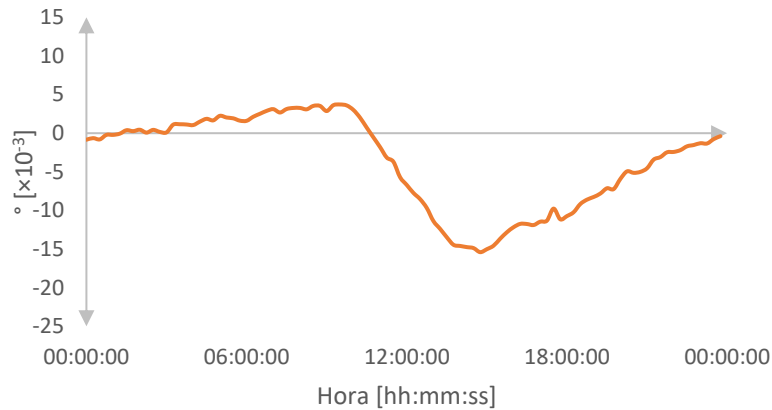


Figura 4.18: Rotações transversais no pilar P5

Relativamente às rotações transversais dos pilares, estas devem-se, não só à variação diferencial no tabuleiro, sobre a qual, como se viu, não é possível tecer conclusões, mas também graças às variações térmicas diferenciais presentes nos pilares. Os sensores de rotação transversal registaram para o caso do pilar P2 uma amplitude de cerca de $12 \times 10^{-3} \text{°}$ enquanto no caso do pilar P5 a rotação medida foi de $15 \times 10^{-3} \text{°}$.

4.3 Modelação numérica da Ponte de São João das Areias

Tendo em vista o auxílio na interpretação dos resultados obtidos na monitorização estrutural da ponte de São João das Areias, recorreu-se ao software de cálculo automático, *SAP2000*, para a elaboração de um modelo numérico de elementos finitos. A elaboração deste modelo prende-se com a representação da resposta da estrutura perante as ações expectáveis a que a mesma está sujeita, bem como a análise de cenários de eventuais danos na estrutura.

4.3.1 Breve descrição do modelo

Neste ponto realiza-se uma descrição sumária e justificativa das simplificações adotadas na construção do modelo numérico, assim como se expõem algumas particularidades inerentes à simulação dos diversos elementos estruturais.



Figura 4.19: Modelo numérico da Ponte de São João das Areias

Relativamente ao tabuleiro optou-se por recorrer a elementos tipo barra (*frame*) para as vigas sendo modeladas no sentido longitudinal e atribuindo uma secção em T a cada uma. Visto as mesmas serem de secção variável optou-se pela divisão por troços representativos de duas secções: secção de apoio e secção de vão, (Figura 4.20), cujas características estão presentes na Tabela 4.1. A laje do tabuleiro foi modelada como elemento tipo casca (*Shell-Thin*) com espessura média de 0,205 m.

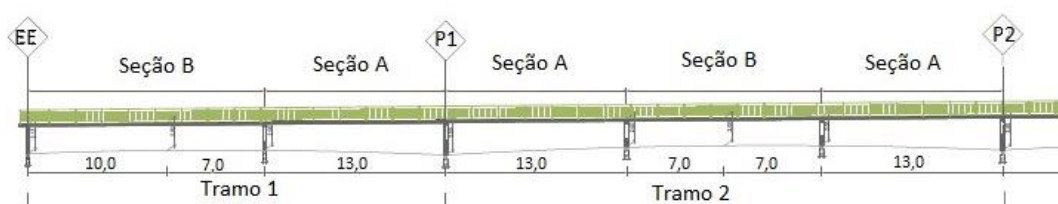


Figura 4.20: Discretização em troços das diferentes secções transversais do tabuleiro adotada no modelo

Tabela 4.1: Propriedades das secções transversais do tabuleiro adotadas no modelo

Secção	Secção de Apoio	Secção de Vão
Designação	Secção A	Secção B
Área	1,699	1,294
I_{xx}	1,068	0,466
I_{yy}	0,942	0,902

A ligação entre a secção transversal do tabuleiro e os pilares foi feita recorrendo a elementos tipo barra, mas ao qual se conferiu um material muito rígido, pretendendo-se assim a

representação do capitel, que dadas as suas dimensões relativamente aos restantes elementos tem um comportamento muito aproximado ao de um corpo rígido.

Quanto aos pilares e aos respetivos embasamentos, todos eles foram modelados com um único elemento tipo barra visto que as secções e características dos mesmos são constantes em todo o seu desenvolvimento. As principais propriedades destes elementos encontram-se presentes na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Propriedades da secção dos pilares e embasamentos

Secção	Pilares	Embasamentos
Área	3,119	9,660
I_{xx}	2,077	7,040
I_{yy}	9,0863	29,055

Relativamente às fundações, utilizaram-se encastramentos perfeitos para os pilares dadas as boas características do terreno de fundação, comprovadas pelas sondagens de prospeção geotécnica. Na zona dos encontros optou-se por materializar a ligação através de apoios unidireccionais, móveis na direção longitudinal, já que os aparelhos de apoio nestas zonas apresentam essa mesma característica.

4.3.2 Considerações sobre o modelo

4.3.2.1 Modelação dos pilares

Tendo em consideração que a seção transversal dos pilares tem a forma de hexágono oco, é necessário verificar se a hipótese da sua modelação recorrendo a elementos do tipo barra é a mais apropriada.

Para o efeito, foram criados dois modelos distintos, o primeiro, Modelo 1, implica a adoção de seis elementos do tipo *Shell*, representando todas as faces da secção, com espessuras de 0,20m e 0,70m, respectivamente para o fuste e embasamentos. No segundo modelo, Modelo 2, considerou-se o pilar e respetivo fuste representados através de elementos de barra aos quais

foram associadas as propriedades da seção. Os dois modelos estão representados na Figura 4.21.

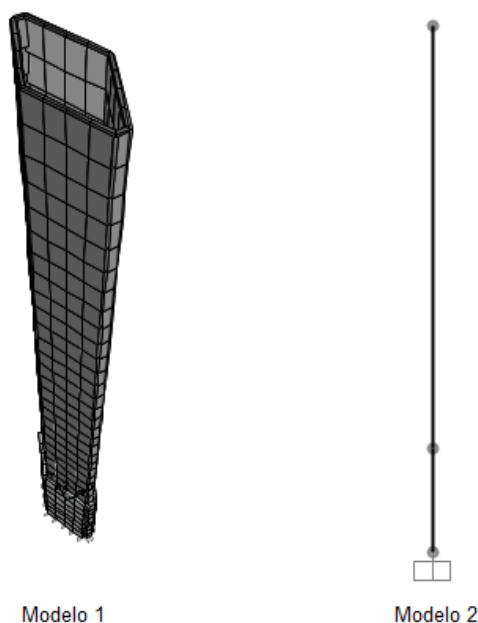


Figura 4.21: Modelos numéricos do pilar com recurso a elementos do tipo casca (Modelo 1) e elementos do tipo barra (Modelo 2)

Tendo em conta o referido no ponto 4.2.2.1, a propósito da variação diária da temperatura média no pilar, uma das faces apresenta uma variação superior às restantes. Assim, aplica-se no Modelo 1, uma variação unitária positiva numa das faces e no modelo 2 aplica-se o gradiente correspondente para as duas direções, direção longitudinal ($0,20^{\circ}\text{C/m}$) e transversal ($0,13^{\circ}\text{C/m}$). Os resultados obtidos para as rotações podem ser consultados na Tabela 4.3 seguinte.

Tabela 4.3: Comparação das rotações nos dois modelos

Grandeza	Modelo 1	Modelo 2	Erro
Rotação Longitudinal	$6,30 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}$	$4,58 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}$	27%
Rotação Transversal	$2,90 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}$	$2,80 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}$	3%

Nas rotações transversais não surgem problemas de maior, no entanto o mesmo não acontece para as rotações longitudinais, que apresentam uma discrepância de mais de 20% entre valores.

Para que o modelo global possa ser utilizado com os pilares com elementos do tipo barra, é necessário aplicar um coeficiente de transformação sobre o valor das rotações para corrigir os resultados obtidos.

Este coeficiente será obtido tendo como base os resultados do Modelo 1, o mais próximo da realidade, adaptando o Modelo 2. Para obter o mesmo valor para a rotação longitudinal nos dois modelos, é necessário aplicar ao Modelo 2 um gradiente de 0,25°C na direção longitudinal. O valor obtido foi conseguido através de um processo iterativo e os coeficientes de transformação a aplicar são, então, dados por 1,25 e 1,13 nas direções longitudinal e transversal, respectivamente.

4.3.2.2 *Ligação dos pilares ao tabuleiro*

No que concerne à ligação entre os pilares e o tabuleiro, o projeto compreende que os pilares P1 e P6 possuem apoios móveis. Na verdade, este tipo de apoios criam uma força de atrito que pode não ser vencida para determinadas ações, nomeadamente para a ação térmica.

Por forma a validar a hipótese de os pilares se encontrarem fixos ao invés de móveis fez-se a comparação entre a força de atrito e a reação que se gera nos pilares para a atuação da variação de temperatura sazonal e diária. O coeficiente de atrito depende do próprio aparelho de apoio instalado e das condições do mesmo, como não é possível quantificá-lo exatamente, assumiu-se que o mesmo possa estar compreendido entre 2% e 5%.

A ação da variação de temperatura ao longo do ano, apresenta uma componente uniforme de 12,5°C no tabuleiro. Já as flutuações diárias são dadas por uma componente uniforme no tabuleiro de 6°C e diferencial nos pilares correspondente a um aquecimento de 3°C numa das faces dos mesmos. Os resultados são os obtidos na seguinte Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Determinação da força de atrito e reações horizontais nos pilares P1 e P6

	Pilar P1	Pilar P6
Ncp	8880,29 kN	8906,66 kN
$\mu = [2\% \text{ a } 5\%]$		
Fa	[177,60 kN a 444,01 kN]	[178,13 kN a 445,33kN]
Variação sazonal de temperatura		
R_{horizontal}	666,52 kN	594,41 kN
Variações diárias de temperatura		
R_{horizontal}	319,93 kN	294,30 kN

Como se pode verificar na tabela anterior, ao longo do ano as reações vencem o atrito dos apoios. Desta forma, no que diz respeito ao modelo, adotam-se os pilares P1 e P6 como móveis no sentido longitudinal da ponte. Relativamente a análises diárias, a força de atrito pode ou não ser vencida para os dois pilares em questão, pelo que o modelo a adotar será o que apresentar resultados mais próximos dos valores reais.

4.3.3 Discussão de resultados obtidos e validação do modelo

Tal como se depreende pelas leituras efetuadas, os efeitos ambientais, nomeadamente as variações de temperatura diárias e sazonais, são as principais ações que interagem com a estrutura. Por conseguinte, submeteu-se o modelo da estrutura a variações uniformes e diferenciais de temperatura e analisaram-se os seus efeitos ao nível do tabuleiro e dos pilares, isoladamente e/ou combinados.

4.3.3.1 Variação sazonal

Começando a análise com as flutuações sazonais das grandezas medidas pelo sistema de monitorização, considerou-se uma variação anual de $\pm 12,5^{\circ}\text{C}$ como variação uniforme da temperatura média no tabuleiro, em concordância com os valores obtidos pelo sistema de monitorização. Para esta ação o modelo apresenta a deformada apresentada nas Figura 4.22 e Figura 4.23.

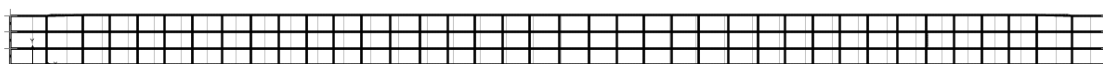


Figura 4.22: Deformada, em planta, do Modelo para uma variação uniforme de temperatura de $+12,5^{\circ}\text{C}$

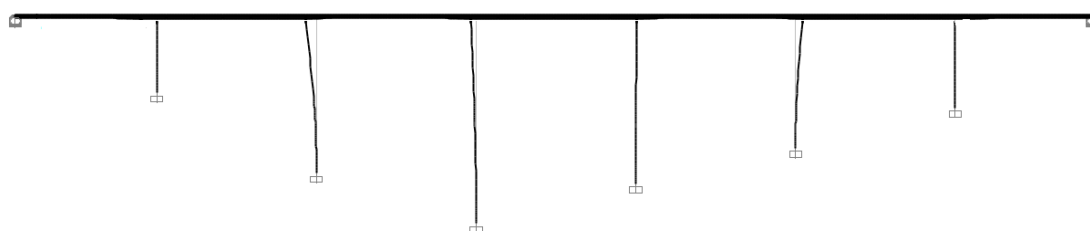


Figura 4.23: Deformada, em alçado, do Modelo para uma variação uniforme de temperatura de $+12,5^{\circ}\text{C}$

Uma variação de temperatura uniforme no tabuleiro introduz, não só deslocamentos, como também rotações no topo dos pilares, neste caso, rotações longitudinais. Os valores obtidos no

modelo para os deslocamentos e para as rotações no topo dos pilares P2 e P5, bem como os respectivos valores reais estão presentes na tabela seguinte, Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Comparação de valores reais e valores obtidos no modelo para os deslocamentos nas juntas e rotações longitudinais nos pilares P2 e P5, para uma variação uniforme de temperatura de +12,5°C

Grandeza	Valores Reais	Valores obtidos no Modelo	Erro
DJ_EE	19,0 mm	18,0 mm	5%
DJ_ED	13,0 mm	14,5 mm	10%
RO_P2_Lo	$30,5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$28,27 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	7%
RO_P5_Lo	$24,5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$22,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	10%

Os valores obtidos no modelo para as rotações foram corrigidos pelo fator de transformação para entrar em consideração com o mencionado no ponto 4.3.2.1. e os resultados obtidos não se divergem muito dos valores reais obtidos na monitorização, com percentagens de erro inferiores a 10%.

4.3.3.2 Variação diária

Relativamente à análise ao longo de um dia de observação, considerando, como primeira hipótese, os pilares P1 e P6 fixos, assumiu-se uma variação uniforme de temperatura no tabuleiro de 6°C, que quando aplicado no modelo, apresenta deformada representada na Figura 4.24 e os resultados para os deslocamentos e rotações nos pilares P2 e P5 são os presentes na Tabela 4.6.

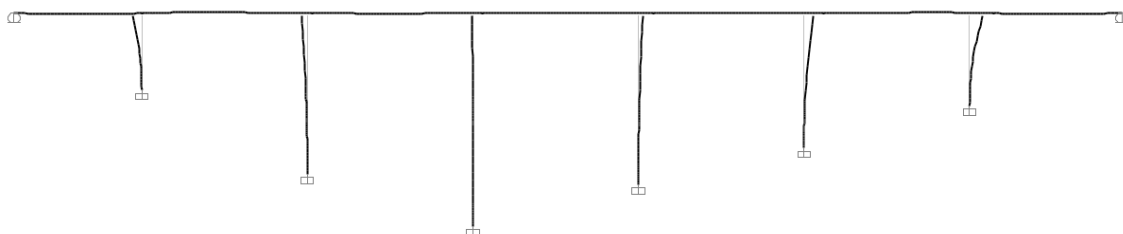


Figura 4.24: Deformada do modelo, com os pilares P1 e P6 fixos, para uma variação uniforme de temperatura de 6°C no tabuleiro

Tabela 4.6: Valores obtidos no modelo para uma variação uniforme de temperatura no tabuleiro

Grandeza	Valores obtidos no modelo
DJ_EE	6,7 mm
DJ_ED	8,5 mm
RO_P2_Lo	$8,58 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
RO_P5_Lo	$17,18 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$

Os valores encontrados dizem respeito apenas a uma variação uniforme de temperatura no tabuleiro, faltando considerar os gradientes térmicos que se geram nos pilares. Para o caso, viu-se anteriormente que uma das faces dos pilares aquece mais que as restantes, com uma diferença de 3°C. Transformando esta diferença em gradientes térmicos segundo as duas direções da seção dos pilares e aplicando no modelo, obtém-se a seguinte deformada (Figura 4.25) e consequentes resultados (Tabela 4.7).

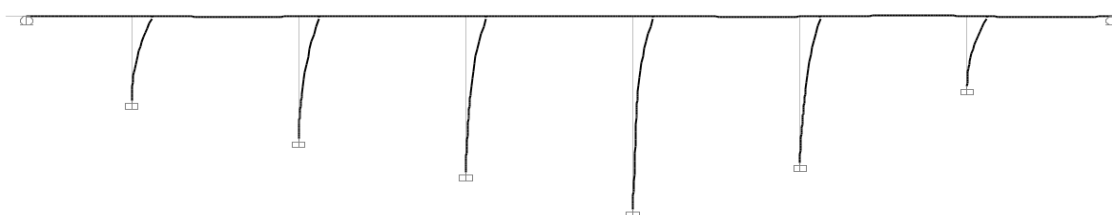


Figura 4.25: Deformada da estrutura para a aplicação de gradientes térmicos nos pilares

Tabela 4.7: Valores obtidos no modelo para aplicação de gradientes térmicos nos pilares

Grandeza	Valores obtidos no modelo
DJ_EE	1,6 mm
DJ_ED	1,6 mm
RO_P2_Lo	$18,34 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
RO_P2_Tr	$9,16 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
RO_P5_Lo	$15,47 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
RO_P5_Tr	$8,59 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$

Para poder comparar os resultados obtidos pelo sistema sensorial instalado na ponte é necessário assumir o efeito conjunto das variações térmicas no tabuleiro e nos pilares. Na

seguinte Tabela 4.8 apresentam-se os resultados obtidos para as duas situações, bem como os valores reais obtidos pelo sistema de monitorização.

Tabela 4.8: Comparação de resultados reais com os obtidos no modelo

Grandeza	Valores reais	Valores obtidos no modelo	Erro
DJ_EE	5 mm	5,1 mm	2%
DJ_ED	11 mm	10,1 mm	8%
RO_P2_Lo	$30,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$26,92 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	10%
RO_P2_Tr	$12,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$9,16 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	24%
RO_P5_Lo	$35,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$32,65 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	7%
RO_P5_Tr	$15,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$8,59 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	43%

É possível perceber que tanto para os deslocamentos como para as rotações longitudinais o modelo não dá erros superiores a 10%. Assim, a hipótese apresentada inicialmente, que considera os pilares P1 e P6 fixos, fica verificada, concluindo-se que as variações térmicas diárias não introduzem esforços suficientes para vencer o atrito nos apoios.

No entanto, para as rotações transversais dos pilares, o erro é bastante elevado. As flutuações a que esta grandeza está sujeita devem-se, não só aos gradientes de temperatura impostos nos pilares, mas também a gradientes de temperatura na direção transversal a nível do tabuleiro. Ora, anteriormente, pela análise dos sensores instalados no tabuleiro, não foi possível quantificar esta ação. No entanto, o facto de apenas se verificarem desvios para as rotações transversais nos pilares permite aferir que esta ação existe e tem um efeito significativo nesta grandeza, apenas não é possível quantificá-lo.

Assuma-se, então, que, no modelo, se considera uma variação de temperatura de $\pm 5^\circ\text{C}$ numa viga de bordo para representar as variações diferenciais de temperatura na direção transversal do tabuleiro.

A Figura 4.26 diz respeito à deformada em planta, enquanto na Figura 4.27 é apresentada a deformada num pilar da ponte através de um corte transversal feito na estrutura.

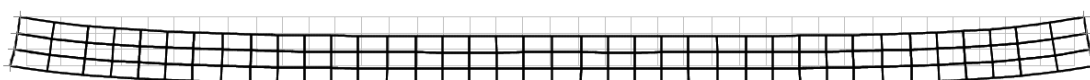


Figura 4.26: Deformada, em planta, do Modelo para uma variação diferencial de temperatura no tabuleiro



Figura 4.27: Deformada de um pilar, obtida através de um corte no tabuleiro

Os resultados consequentes desta ação podem ser consultados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Valores obtidos no modelo para uma variação diferencial de temperatura no tabuleiro

Grandeza	Valores obtidos no Modelo
RO_P2_Lo	$1,44 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
RO_P2_Tr	$5,16 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
RO_P5_Lo	$2,86 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
RO_P5_Tr	$6,30 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$

A ação anterior provoca rotações transversais e longitudinais no topo dos pilares. Relativamente às rotações longitudinais, estas surgem, ainda que não muito expressivas quando comparados com os resultados já apresentados. No entanto, quando combinados com os resultados anteriores poderão levar a erros entre os valores reais e numéricos inferiores aos existentes.

A grandeza mais interessante é a que diz respeito às rotações transversais, a demonstrarem-se mais significativas sob esta ação.

Os resultados combinados de todas as ações anteriores, no que diz respeito às flutuações diárias estão apresentadas na Tabela 4.10 seguinte.

Tabela 4.10: Comparação de resultados reais com os obtidos no modelo

Grandeza	Valores reais	Valores obtidos no modelo	Erro
DJ_EE	5 mm	5,1 mm	2%
DJ_ED	11 mm	10,1 mm	8%
RO_P2_Lo	$30,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$28,36 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	5%
RO_P2_Tr	$12,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$14,32 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	16%
RO_P5_Lo	$35,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$35,51 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	1%
RO_P5_Tr	$15,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	$14,89 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$	1%

Como se pode verificar pela tabela, o erro relativo às rotações longitudinais no topo dos pilares P2 e P5, que anteriormente apresentava, respectivamente, valores de 10% e 7% desceu, agora para 5% e 1%.

Apesar do erro para a rotação transversal do pilar P2 ainda se encontrar acima dos 10%, a sua descida comparativamente a valores anteriores é bastante considerável. Note-se, o caso do pilar P5, em que o valor passa dos 43% para 1%.

Desta forma, prova-se a existência de variações diferenciais na direção transversal do tabuleiro e a dimensão, muito significativa, dos seus efeitos nas grandezas alvo de medição pelo sistema de monitorização instalado.

4.4 Análise de eventuais cenários de dano

Concluída a análise evolutiva das diferentes grandezas para as ações ambientais, consideradas como determinantes na resposta da estrutura, e a calibração do modelo numérico utilizado, estende-se agora o estudo para a previsão de eventuais alterações da integridade estrutural da mesma.

Como é sabido, a base dos pilares da ponte de São João das Areias apresenta elevado grau de deterioração, deixando a estrutura numa situação de controlo permanente. Para o caso de uma eventual ocorrência, como por exemplo, o destaque de um bloco de betão na zona dos embasamentos devido à fendilhação, interessa, essencialmente, perceber como é que o mesmo se traduz no resto da estrutura.

Para o efeito, e por forma a simular um dano associado as debilidades apresentadas, recorre-se à imposição de uma rotação unitária ($1,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$) na base dos pilares P1 e P2, separadamente.

As deformadas da estrutura, para os dois casos, apresentam-se nas Figura 4.28 e Figura 4.29, respetivamente para o pilar P1 e P2.

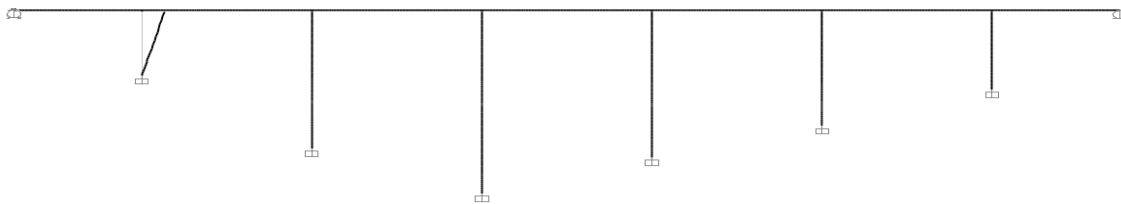


Figura 4.28: Deformada da estrutura para a uma rotação imposta unitária na base do pilar P1

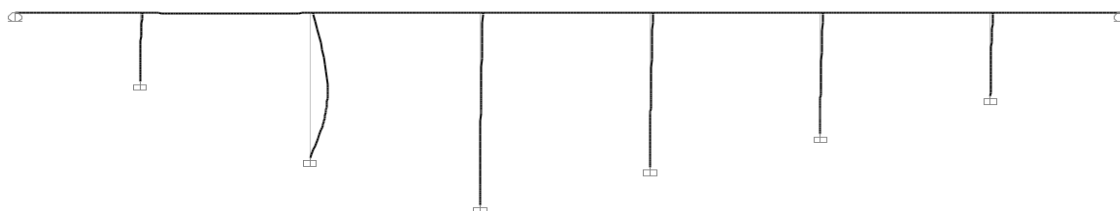


Figura 4.29: Deformada da estrutura para uma rotação imposta unitária na base do pilar P2

O efeito isolado desta imposição traduz-se com elevado relevo, no próprio pilar, conduzindo a rotações no seu topo iguais a $1,0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$ para o caso do pilar P1, que se encontra móvel na ligação ao tabuleiro e $0,6 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$ para o caso em que a rotação foi imposta na base do pilar P2, que se encontra fixo na ligação ao tabuleiro.

Ao nível do tabuleiro, as consequências também se fazem sentir para o caso em que o eventual dano se venha a dar num pilar fixo. Os deslocamentos que se verificam nas juntas de dilatação para uma rotação imposta no pilar P2, pilar fixo ao tabuleiro, são da ordem dos 1,5 mm.

4.4.1 Sistema de vigilância e limites de alerta implementados

Por forma a complementar a análise do comportamento da estrutura e a detetar eventuais alterações na condição estrutural da ponte, o sistema de monitorização da ponte compreende um modelo estatístico de regressão linear múltipla que permite prever o comportamento da estrutura através de uma relação entre as grandezas estruturais medidas com base na compensação das grandezas ambientais.

As variáveis de entrada são, então, as leituras efetuadas pelos diferentes sensores de temperatura instalados. Incluem-se nestes os quatro sensores instalados no tabuleiro, os quatro

sensores no pilar, o sensor instalado junto ao inclinómetro e o sensor que permite a medição da temperatura ambiente.

Consequentemente, as variáveis de saída são as leituras efetuadas pelos sensores de rotação, tanto longitudinal como transversal instalados nos pilares e ainda os sensores instalados nas juntas dos encontros esquerdo e direito que permitem a leitura dos deslocamentos.

Com este modelo gera-se uma série de estimativas para as diferentes leituras caracterizadoras do comportamento da estrutura. No entanto, o que gera real interesse em ser controlado ao longo do tempo é a diferença entre os valores previstos para as grandezas e os seus valores reais. Diferença esta que, se numa eventualidade apresentar valores anormais se traduz numa alteração do comportamento da estrutura. A este indicador dá-se o nome de resíduo. Numa continuação dos resultados apresentados anteriormente, nas Figura 4.30 e Figura 4.31 estão presentes os resíduos para as rotações longitudinais nos pilares P2 e P5, respectivamente.

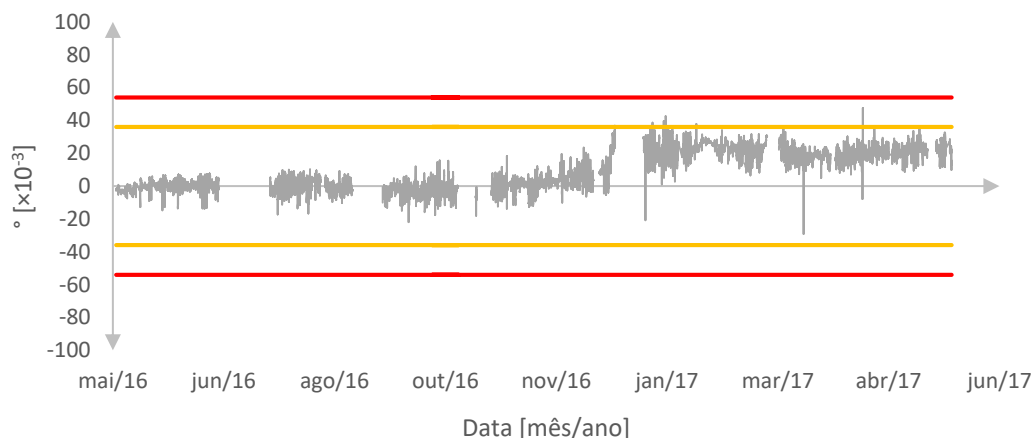


Figura 4.30: Resíduo entre a rotação longitudinal medida e estimada para o pilar P2

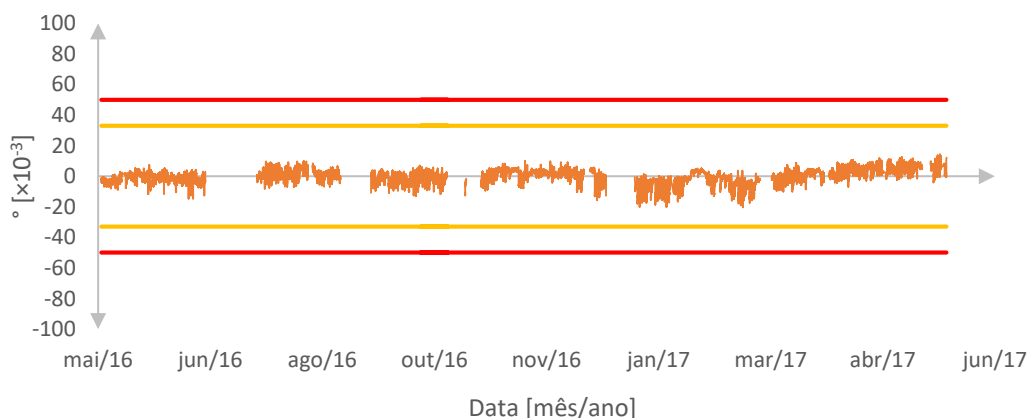


Figura 4.31: Resíduo entre a rotação longitudinal medida e estimada para o pilar P5

No que diz respeito ao pilar P5, o seu comportamento segue perfeita concordância com a previsão estabelecida não se assinalando nenhum desvio do resíduo nem nenhum sinal de alerta.

O mesmo não se pode dizer em relação ao pilar P2. Neste caso, o resíduo indica que a rotação longitudinal no topo do pilar sofreu um desvio da previsão efetuada. O seu valor aumenta a partir de Janeiro de 2017 e mantém-se ao longo do tempo.

Esta anomalia verificada para o caso do pilar P2, tendo em conta a altura do ano em que acontece e o facto de se ter uma deformação permanente, poderá estar relacionada com um aterro feito junto a este pilar para facilitar o acesso do equipamento para realizar as estacas de reforço.

As linhas a amarelo e a vermelho presentes nos gráficos anteriores dizem respeito aos limites de alerta amarelo e vermelho, respectivamente. Estes limites foram definidos pela equipa Projetista e são considerados como níveis de aviso no sistema de alarme. Assim que um dos níveis for atingido, nas diversas grandezas, o sistema de monitorização instalado está programado para enviar uma mensagem de alerta a todas as entidades envolvidas.

O alerta amarelo surge como nível de aviso caso o resíduo entre os valores medidos e a previsão da resposta da estrutura seja superior a cerca de dez vezes o desvio padrão do modelo estatístico. Considera-se que a estrutura se está a afastar do seu comportamento previsível.

Já o alerta vermelho acontece quando o resíduo entre os valores medidos e previstos atinge um valor de uma vez e meia superior ao valor do alerta amarelo. Neste caso, considera-se que a estrutura se afasta significativamente do seu comportamento previsto, levando a estudos complementares por parte das entidades responsáveis com vista à avaliação da condição efetiva da estrutura.

4.4.2 Implicações dos limites de alerta a nível estrutural

Tendo deslocamentos e rotações na estrutura, necessariamente têm-se esforços nos diferentes elementos, sendo de todo o interesse perceber o quão significativos são quando comparados com a capacidade resistente da secção. Neste contexto, estudou-se no modelo os esforços, nomeadamente, o momento fletor e o esforço axial a que o pilar está sujeito para a situação em que o sistema de monitorização emite sinais de alerta.

Acrescenta-se que este procedimento compreende uma análise não linear da estrutura. Assim, considerou-se, de forma simplificada, a fendilhação do betão na base do pilar através de uma redução de 50% da rigidez inicial, para ter em conta a não linearidade física do material. Relativamente à não linearidade geométrica, analisou-se, através do modelo, o agravamento dos efeitos de 2ª ordem resultantes da definição das equações de equilíbrio na posição deformada da estrutura.

Para o efeito, tem-se que para o caso do pilar P2 o nível de alerta é atingido quando a rotação no topo do pilar atinge uma rotação de valor superior ou igual a $36 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$. Tendo em conta o ponto 4.3.4., aquando a análise de cenários de danos, para se ter uma rotação no topo do pilar de valor igual ao mencionado, impõe-se na base uma rotação de $60 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$ ($36 \times 10^{-3} \text{ }^\circ / 0,6$).

Os esforços, de 1ª e 2ª ordem, a que o pilar está sujeito, são os presentes na Tabela 4.11 seguinte.

Tabela 4.11: Esforços na base do pilar P2 para o alerta amarelo

Esforços Pilar P2- Alerta Amarelo		
	Análise Linear	Análise Não Linear
Nsd	-9740 kN	-9740 kN
Msd	2498,0 kN.m	2414,0 kN.m

Note-se que para este caso os efeitos de 2ª ordem acabam por reduzir os momentos na base do pilar.

4.4.2.1 Análise linear e análise não linear dos pilares

Para melhor se perceber o efeito anterior, considerando o caso em que as rotações atingem o alerta amarelo, discretizou-se o pilar em cinco segmentos iguais, tal como se mostra seguidamente (Figura 4.32).



Figura 4.32: Discretização do pilar da ponte

Os momentos resultantes, nos seis pontos definidos, pela análise linear e não linear podem ser consultados na Tabela 4.12 seguinte.

Tabela 4.12: Momentos nos pontos de discretização do pilar da ponte

Pontos	Análise Linear	Análise Não Linear
6	0 kN.m	0 kN.m
5	499,6 kN.m	523,01 kN.m
4	999,2 kN.m	1036,08 kN.m
3	1498,8 kN.m	1529,0 kN.m
2	1998,4 kN.m	1991,7 kN.m
1	2498,0 kN.m	2414,0 kN.m

Note-se que, nestas condições, os efeitos de 2ª ordem agravam os momentos fletores ao longo fuste, mas em contrapartida acabam por reduzir os momentos na secção condicionante, a base do pilar. Esta secção cujo apoio é simulado através de um encastramento, os momentos resultantes dos efeitos P-delta são de sinal contrário aos obtidos pela análise de 1ª ordem induzidos pela rotação imposta na base.

4.4.2.2 Esforços gerados na estrutura para a situação de alerta

Explicado o fenómeno anterior, passa agora o estudo para os efeitos da imposição de rotações no pilar P2. No entanto, quando se impõe uma rotação num pilar fixo, surgem deslocamentos no topo do pilar. Estes deslocamentos sentem-se ao nível do tabuleiro e no topo dos restantes pilares. Neste sentido avaliam-se também os esforços que surgem nos restantes pilares da ponte para os deslocamentos impostos no seu topo correspondentes à situação em a rotação no topo do pilar P2 atinge o valor do alerta amarelo.

Na Tabela 4.13 seguinte apresentam-se os valores para os esforços normais devidos às cargas permanentes e momentos fletores nos restantes três pilares fixos da ponte. Verifica-se que o incremento do momento fletor depende da rigidez de cada pilar sendo maior no pilar P5 como é natural.

Tabela 4.13: Pares de esforços gerados nos pilares da ponte devido a uma rotação imposta no pilar P2 de alerta amarelo

Pilar	Esforço normais (N)	Momento Fletor (M)
P2	-9740 kN	2414,0 kN.m
P3	-9558 kN	881,1 kN.m
P4	-9623 kN	1451,2 kN.m
P5	-10060,51 kN	2509,8 kN.m

A análise anterior apenas faz sentido quando comparada com a capacidade resistente do pilar à flexão composta. O diagrama de interação entre o esforço normal (N) e o momento fletor (M) na direção longitudinal da ponte, para a seção do pilar, é o expresso na Figura 4.33 seguinte. Neste mesmo diagrama estão apresentados os pontos correspondentes ao esforço normal e ao incremento de momento fletor nos pilares fixos da ponte na situação em que o pilar P2 atinge a rotação definida como alerta amarelo.

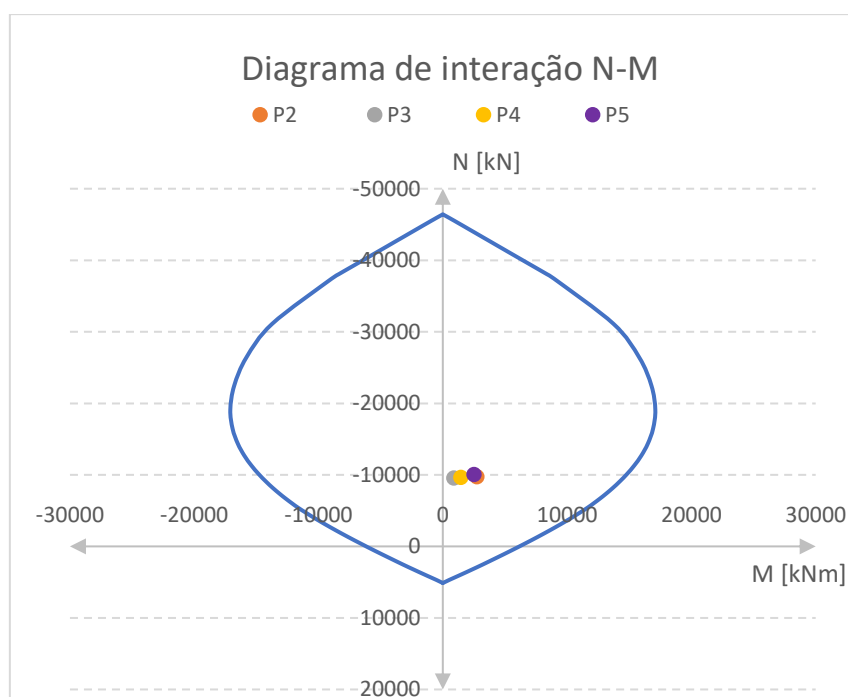


Figura 4.33: Diagrama de interação N-M e representação do par de esforços nos pilares da ponte

A análise separada deste efeito nos pilares não permite fazer adequadas comparações com a capacidade resistente da secção. No entanto, note-se que o incremento do momento fletor para a situação descrita é significativo. Mais importante, como seria de esperar, no pilar P2 com uma percentagem de cerca de 20% da resistência da secção sem danos.

Veja-se, agora, o que acontece quando a rotação dos pilares atinge o alerta vermelho. Para este caso, o limite corresponde a uma rotação de $54 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$ no topo do pilar e, portanto, a uma imposição de $90 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$ para a rotação na base do pilar. Os esforços correspondentes podem ser verificados na Tabela 4.14 seguinte.

Tabela 4.14: Esforços no pilar P2 para o alerta vermelho

Esforços Pilar P2- Alerta Vermelho		
	Análise Linear	Análise Não Linear
Nsd	-9740 kN	-9740 kN
Msd	7373,9 kN.m	7093,2 kN.m

Tal como verificado para o caso anterior, a Tabela 4.14 permite concluir que a análise não linear tem um efeito benéfico nos momentos na seção condicionante do pilar.

Veja-se, agora, as suas consequências nos restantes pilares. Na Tabela 4.15 seguinte apresentam-se os valores para os esforços normais e incrementos de momentos fletores nos restantes três pilares fixos da ponte devidos ao deslocamento que surge no topo dos mesmos graças à rotação imposta no pilar.

Tabela 4.15: Pares de esforços nos pilares fixos da ponte devido a uma rotação imposta no pilar P2 de alerta vermelho

Pilar	Esforço normais (N)	Momento Fletor (M)
P2	-9740 kN	7093,2 kN.m
P3	-9558 kN	1349 kN.m
P4	-9623 kN	2199,8 kN.m
P5	-10060,51 kN	3855,9 kN.m

Para se ter uma melhor percepção do nível de esforço comparativamente à capacidade resistente da seção, apresenta-se na Figura 4.34 seguinte o diagrama de interação N-M. Neste mesmo diagrama estão apresentados os pontos correspondentes ao esforço normal e ao incremento de momento fletor nos pilares fixos da ponte na situação em que o pilar P2 atinge a rotação definida como alerta vermelho.

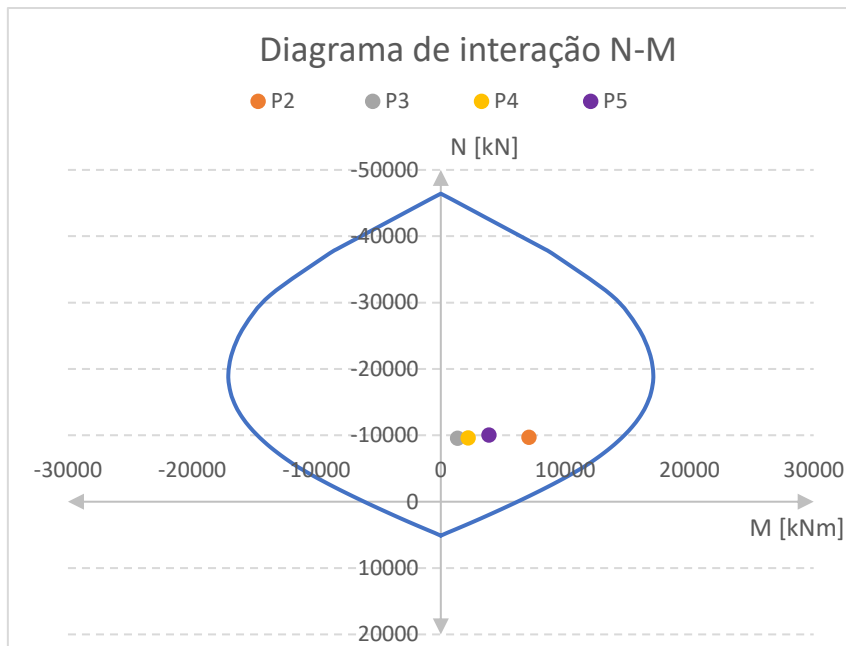


Figura 4.34: Diagrama de interação N-M e representação do par de esforços nos pilares fixos da ponte

Note-se que para o caso do pilar P2, o efeito, tal como era esperado é mais gravoso no caso do alerta vermelho e o incremento do momento fletor corresponde a cerca de 50% em relação à capacidade resistente da seção sem danos. Nos restantes pilares, tal como para o caso anterior, os efeitos são menos significativos.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo do trabalho apresentaram-se os resultados das leituras efetuadas pelo sistema de monitorização instalado na ponte de São João das Areias e conclui-se que, de um modo geral, existe concordância entre os movimentos de juntas e as rotações dos pilares com as variações térmicas que a estrutura experimenta. Constata-se, assim, que existe uma forte correlação entre a temperatura média que a estrutura experimenta e a sua resposta estrutural.

A comparação dos resultados obtidos através do modelo numérico inicial com os resultados da instrumentação permitiu calibrá-lo, tornando-o mais fiável ao ponto de apresentar erros pouco significativos quando comparados com os reais. A única exceção passa pela rotação transversal do pilar P2, a única com um erro superior a 10%.

Note-se que o sistema de monitorização apenas prevê a leitura de temperaturas para um único tramo do tabuleiro e um único pilar da ponte. As variações térmicas e os seus efeitos não são constantes em toda a estrutura da ponte, pelo que os resultados obtidos para o modelo não passam de previsões assentes na simplificação de que a variação de temperatura registada no

tabuleiro se mantém em todo o seu comprimento e as variações encontradas se sentem exatamente da mesma forma em todos os pilares da ponte.

O local de instalação dos sensores não permite a detecção de eventuais variações diferenciais de temperatura na direção transversal do tabuleiro. No entanto, através dos resultados obtidos no modelo é possível concluir que estas existem e têm influência sobretudo no que diz respeito às rotações transversais no topo dos pilares.

Por forma a complementar a análise ao comportamento da estrutura foram estudados os resultados obtidos através do modelo estatístico, parte do sistema instalado, que visa a compensação dos efeitos ambientais sobre a estrutura. Com o resíduo encontrado pela diferença entre o valor medido e o valor estimado é possível detetar alterações no comportamento da estrutura e alertar para eventuais danos na estrutura.

Através da análise de cenários de danos no modelo numérico foi possível verificar que qualquer alteração na composição e integridade da base dos pilares, onde se regista um elevado grau de deterioração, traduzida numa rotação imposta nesse mesmo local, tem repercussões em toda a estrutura.

O acompanhamento permanente da estrutura, através da análise do resíduo e da avaliação das mensagens de alerta tomam elevada importância no estudo da integridade de uma obra de arte desta dimensão e no contexto em que se insere.

Com o modelo devidamente calibrado passa agora a ser possível estudar o comportamento da estrutura e antecipar consequências de eventuais danos. Concluiu-se que as repercussões de um dano se sentem não só ao nível de deslocamentos impostos como também a nível de esforços a que a estrutura está sujeita.

5. Conclusão

5.1 Considerações finais

De uma forma cada vez mais evidente, os sistemas de monitorização da integridade estrutural desempenham um papel crucial na gestão de infraestruturas de engenharia civil. Enquadrada neste facto, esta dissertação constitui um contributo para o conhecimento das diversas potencialidades dos sistemas de monitorização para a interpretação e diagnóstico das mesmas. Graças a desenvolvimentos experienciados na área da instrumentação e de sistemas automáticos de aquisição e de processamento de dados torna-se possível o acesso a informação essencial acerca da integridade das estruturas.

Neste contexto, primeiramente, o trabalho centrou-se na apresentação do conceito de monitorização da integridade estrutural. Numa descrição teórica, apresentam-se os diversos componentes que compõem um sistema de monitorização, apresentando-se alguns exemplos do que existe no mercado a nível de sensores, redes de comunicação, processamento e tratamento de dados.

Como o objetivo principal passa pela análise do comportamento de uma estrutura, apresentam-se as vantagens da utilização de modelos de cálculo automático como ferramentas de apoio, não só na avaliação da integridade de uma estrutura, como também no estudo de ações de carácter preventivo.

Destaca-se, também, o estudo sobre quais as grandezas estruturais mais relevantes a controlar e qual a melhor forma de o fazer. O confronto entre possibilidades existentes associado aos desenvolvimentos tecnológicos permitiu destacar diferentes tecnologias sensoriais e identificar as maiores potencialidades e fragilidades de cada uma. Para além disso e acima de tudo, este processo proporcionou um esclarecimento sobre qual a melhor forma de conseguir atingir os objetivos da observação de estruturas.

Posteriormente, conhecidos os propósitos da monitorização estrutural foi possível aplicar a um caso prático, a Ponte de São João das Areias. Na verdade, esta estrutura apresentava uma excessiva fendilhação característica de um evidente débil estado de conservação. As reações expansivas álcalis-silica que afetam o betão das fundações e parte inferior dos pilares, levou a que a estrutura fosse sujeita a obras de requalificação e reforço. Neste contexto, a mesma foi

instrumentada, antes e durante as obras, por forma a conseguir um acompanhamento constante do comportamento da estrutura.

O estudo sobre um ano de observação, leva a crer que a resposta da estrutura está fortemente ligada com as variações térmicas sentidas pelo betão nos diversos elementos.

Uma avaliação mais criteriosa das leituras medidas pela rede de sensores permite obter ordens de grandeza para os valores das rotações no topo dos pilares e deslocamentos nas juntas de dilatação, através dos quais foi possível calibrar o modelo numérico.

Ainda em relação à observação da estrutura, com o intuito de gerar um sistema de vigilância, interpretaram-se os resultados obtidos pelo modelo estatístico implementado juntamente com o sistema de monitorização. Este modelo permite prever o comportamento da estrutura, deduzindo as grandezas estruturais, com base numa ponderação linear das grandezas ambientais. Avaliou-se a diferença entre as grandezas medidas e as grandezas estimadas por esta via, ao qual foi dado o nome de resíduo.

O resíduo, desta forma, serve como um indicador que permite detetar alterações no comportamento da estrutura em relação àquilo que se considera o previsível. Como tal, é objeto de análise ao longo do tempo. Para além do demais, este indicador serviu como base para a definição de níveis de alerta implementados. Para cada grandeza preconizou-se a existência de dois níveis, amarelo e vermelho, definidos como limites extremos para um desvio da leitura menos ou mais significativo do espectável.

Finalmente, nesta dissertação procura-se utilizar o modelo calibrado para a simulação de cenários que, de certa forma, representem um dano associado ao estado de deterioração da estrutura. Um dano, como o destacamento de um bloco de betão da zona fraturada do embasamento do pilar ou da fundação foi simulado através de uma rotação imposta na base de um pilar e avaliaram-se os seus efeitos na estrutura.

Estudaram-se, ainda, as implicações associadas a uma rotação do pilar P2 com valores de alerta amarelo e vermelho. Conclui-se que as mesmas correspondem, respectivamente, a cerca de 20% e 50% da capacidade resistente da secção dos pilares, valores que se entendem como bastante significativos.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Terminada a dissertação onde a maioria dos objetivos estabelecidos foram alcançados, existem ainda alguns aspetos que merecem ser discutidos para eventuais desenvolvimentos futuros.

Começando pelo sistema de monitorização instalado na ponte, é perceptível que os resultados são fiáveis, no entanto seria conveniente ter-se uma disposição de sensores de modo a captar

as variações diferenciais de temperatura no tabuleiro as quais induzem movimentos não desprezáveis na estrutura.

Sugere-se, ainda, uma revisão dos níveis de alerta estabelecidos para os deslocamentos e rotações nos diferentes elementos instrumentados. Os mesmos, instituídos no início da monitorização, poderão ser melhor ajustados ao comportamento da estrutura tendo em conta dados mais recentes da monitorização. Para além disso, poderá ser interessante incorporar, de certa forma, na definição dos níveis de alerta, a capacidade resistente da seção.

Importa realçar que na análise dos cenários de dano e implicações na globalidade da estrutura, recorreu-se a uma análise não linear dos pilares com simplificações quanto à não linearidade física. Lembra-se que se definiu uma rigidez da seção fendilhada como 50% da rigidez inicial, sendo importante um estudo mais detalhado neste aspeto.

Para terminar, seria interessante para o caso de estudo da ponte de São João das Areias, prever um sistema que seja capaz de avaliar a estrutura a nível da deterioração do betão e corrosão das armaduras para permitir um correto controlo da durabilidade da estrutura. Note-se que toda esta dissertação se desenvolveu sob motivação da avaliação das consequências ao nível do comportamento estrutural do estado de conservação da base dos pilares e respetivas fundações.

6. Bibliografia

- Ansari, F. (2005). *Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring*. Chicago, USA: Springer.
- Arêde, A., Costa, A., Costa, C., Barbosa, C., & Costa, P. (2005). Monitorização do comportamento estrutural de uma ponte nova em arcos de alvenaria de pedra. *06 Congresso Nacional em Mecânica Experimental*. Ponta Delgada, Açores.
- Assis, W. S. (2007). *Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo: Dissertação de Doutoramento.
- A2P – Estudos e Projectos (2013). *Reabilitação dos pilares da Ponte de São João das Areias*. Lisboa: Memória Descritiva e Justificativa
- A2P – Estudos e Projectos (2014). *Ponte de São João das Areias – Monitorização do comportamento estrutural*. Lisboa: Memória Descritiva
- A2P – Estudos e Projectos (2014). *Sistema de Monitorização Estrutural da Ponte de São João das Areias sobre o Rio Mondego na EN234-6*. Lisboa:
- A2P – Estudos e Projectos (2014). *Sistema de Monitorização Estrutural da Ponte de São João das Areias sobre o Rio Mondego na EN234-6-Proposta dos limites de alerta com base no histórico dos resultados*. Lisboa:
- Bisby, L. (2004). An Introduction to Structural Health Monitoring. *ISIS Canada Educational Module No.5*, 1-37.
- Cavadas, F. J. (2008). *Monitorização e Análise de Pontes Metálicas Antigas - A Ponte Eiffel*. FEUP, Porto: Dissertação de Mestrado.
- Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*. California, USA: Master.
- Farhey, D. N. (2005). Bridge Instrumentation and Monitoring for Structural Diagnostics. *Structure Health Monitoring - International Journal*, 301-318.
- Faria, A. M. (2010). *Avaliação do desempenho de sistemas de monitorização de estruturas*. FEUP, Porto: Dissertação de Mestrado.
- Félix, C. (2004). *Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte*. FEUP, Porto: Dissertação de Doutoramento.

- Félix, C., Rodrigues, C., Faria, R., & Figueiras, J. (Outubro de 2012). Monitorização na Construção e na Conservação de Obras de Arte.
- Figueiredo, E. J. (2006). *Monitorização e Avaliação do Comportamento de Obras de Arte*. FEUP, Porto: Dissertação de Mestrado.
- Fraga, F. D. (2015). *Monitorização de Edifícios Patrimoniais*. FEUP. FEUP, Porto: Dissertação de Mestrado.
- Fraser, M. S. (2006). *Development and Implementation of an Integrated Framework for Structural Health Monitoring*. Universidade da Califórnia, San Diego: Dissertação de Doutoramento
- Hearn, G., Puckett, J., Friedland, I., Everett, T., Hurst, K., Romack, G., . . . Young, R. (2005). *Bridge Preservation and Maintenance in Europe and South Africa*. Washington, USA.
- Hejll, A. (2007). *Civil Structural Health Monitoring-Strategies, Methods and Applications*. Universidade Técnica de Lulea, Suécia: Dissertação de Doutoramento.
- Ko, J. M., & Ni, Y. Q. (2005). Technology developments en structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures* 27, 1715-1725.
- Kromanis, R., Kripakaran, P., & Harvey, B. (2015). Long-term structural health monitoring of the Cleddau bridge: evaluation of quasi-static temperature effects on bearing movements. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 1342-1355.
- Li, H.-N., Li, D.-S., & Song, G.-B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures* 26, 1647-1657.
- Lynch, J. P., Law, K. H., & Kiremidjian, A. S. (12-14 de Setembro de 2001). The Design of a Wireless Sensing Unit for Structural Health Monitoring . *3rd International Workshop on Structural Health Monitoring*
- Magalhães, F., Cunha, Á., & Caetano, E. (2010). Monitorização Dinâmica Contínua da Ponte Infante D. Henrique . *BE2010-Encontro Nacional Betão Armado* . Lisboa .
- Mufti, A. (2005). Structural health monitoring of innovative bridge decks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 119-133.
- Pagán-Ortiz, J. E. (2014). *State of the Practice and Art for Structural Health Monitoring of Bridge Substructures*.
- Pan, D.-G. (2015). Comprehensive Real-Time Bridge Health Monitoring System of Tongtai Bridge. *MATEC Web of Conferences* 31 (pp. 11003(1-4)). China: EDP Scienses.
- Reis, A. J. (2001). *Projecto de Pontes. Ações e Segurança Estrutural*. Lisboa: IST .
- Ribeiro, L. M. (2013). *Técnicas de deteção de dano estrutural com base na monitorização*. ISEP, Portp: Dissertação de Mestrado.

Rodrigues, C., Félix, C., Figueiras, & J. (Junho, 2013). Monitorização Estrutural de Pontes com Sistemas em Fibra Óptica - Três exemplos em Portugal. *3º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP2013*.

Vitório, A. (2002). *Pontes Rodoviárias-Fundamento, Conservação e Gestão*. Recife, Pernambuco, Brasil : Mayra Melo.

Sites consultados:

Web site de Micron Optic: <https://www.mra.pt>, acedido em Março de 2017

Web site do grupo SLB Automação: <http://0201.nccdn.net>, acedido em Março de 2017

Web site do grupo RDP : <http://www.rdpe.com>, acedido em Março de 2017

Web site do grupo Jewell Instruments : <http://jewellinstruments.com>, acedido em Março de 2017

Web site do grupo ECIL: <http://www.ecil.com.br>, acedido em Março de 2017

Web site da Data Taker: <https://datataker.com.br>, acedido em Março de 2017

Programas utilizados:

SAP2000, versão 18.1.1

AutoCad 2016, versão estudante