



EMILY CUNHA SANCHES

Licenciada em Engenharia Civil

# REABILITAÇÃO DE TIRANTES DE PONTES. DOIS CASOS DE ESTUDO EM PORTUGAL.

MESTRADO EM REABILITAÇÃO DOS EDIFÍCIOS

Universidade NOVA de Lisboa

Julho, 2022



# REABILITAÇÃO DE TIRANTES DE PONTES. DOIS CASOS DE ESTUDO EM PORTUGAL

**Emily Cunha Sanches**

Licenciada em Engenharia Civil

**Orientador:** António Paulo Campos da Silveira  
Investigador Principal, LNEC

**Coorientador:** António Lopes Batista  
Professor Associado Convidado, Universidade NOVA de Lisboa  
Investigador Principal com Habilitação, LNEC

## Júri:

**Presidente:** Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques  
Professor Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa

**Arguente:** Doutor Filipe Amarante dos Santos  
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa

**Orientador:** Doutor António Paulo Silveira  
Investigador Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil



Copyright © Emily Cunha Sanches, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Ao meu avô Vicente, com amor e saudade.*



## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação enquadrou-se no âmbito do acolhimento no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), mais concretamente no Departamento de Estruturas (DE), ao abrigo do protocolo de cooperação com o Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC/FCT/UNL). O LNEC proporcionou todas as condições e apoios necessários para levar a efeito o trabalho definido para a dissertação.

Agradeço, em primeiro lugar, aos orientadores, o Investigador Principal do LNEC António Paulo Campos Silveira e o Professor Associado Convidado António Lopes Batista (e também investigador do LNEC), pelos incentivos para a realização do trabalho, por todos os conhecimentos transmitidos e pela disponibilidade demonstrada durante o período de elaboração e revisão da dissertação.

Agradeço aos docentes do DEC/FCT/UNL, em particular à Professora Paulina Faria, coordenadora do Mestrado, todos os ensinamentos transmitidos e o apoio para a realização da dissertação.

Agradeço também à Armando Rito Engenharia (ARE) e à Dywidag Portugal a disponibilização de muitos elementos sobre a reabilitação dos tirantes das pontes Edgar Cardoso na Figueira da Foz e Internacional do Guadiana, em Castro Marim.

Deixo o meu agradecimento à minha família, aos meus pais, Luis Sanches e Cristiane Sanches, por serem os maiores incentivadores na minha jornada. Por todos os ensinamentos, as horas de dedicação, amor e carinho e, principalmente, pela educação e princípios que me deram. Também por me ensinarem a seguir os meus sonhos através do meu estudo e esforço. Agradeço ainda aos meus avós, Enilda, Jaime e Alair, ao meu irmão, Daniel Sanches, e ao meu namorado Guilherme Santos, pelo amor, suporte e paciência.



*“Vai dar certo!”*



## RESUMO

As pontes de tirantes são utilizadas, cada vez mais, como soluções arrojadas, dada a sua capacidade de vencer grandes vãos, associada à elegância das suas estruturas. Tal deve-se à evolução que se tem verificado na sua conceção, em particular no que diz respeito aos sistemas de atirantamento.

Na dissertação aborda-se, em primeiro lugar, a evolução dos sistemas estruturais deste tipo de pontes, com ênfase nas pontes construídas em Portugal. De seguida é sintetizada a importância das inspeções periódicas, associadas aos resultados fornecidos pelos sistemas de monitorização das obras, para prevenir e/ou detetar as anomalias existentes nas estruturas. São ainda abordados os processos e as anomalias que conduzem à degradação dos tirantes. Os diferentes processos de deterioração e substituição de tirantes em pontes são analisados em detalhe com recurso a dois casos de estudo portugueses, o da ponte Edgar Cardoso (Figueira da Foz) e o da ponte Internacional do Guadiana (Castro Marim), ambas com mais de trinta anos de vida. Nestes casos de estudo são descritas as anomalias encontradas nos tirantes, aquando das inspeções realizadas, e analisadas as soluções de reabilitação selecionadas para a substituição dos tirantes de cada uma delas, que atenderam à especificidade estrutural das obras. Por último, é feita uma análise comparativa entre as soluções de reabilitação utilizadas nos casos de estudo, tendo por base uma análise estrutural não-linear, simulando a redistribuição de esforços associados à remoção de tirantes.

Os estudos realizados nesta área são importantes no âmbito da engenharia civil, na medida em que contribuem para aumentar a vida útil das estruturas, para além de garantirem a segurança.

**Palavras chave:** Pontes de tirantes; Anomalias em tirantes; Monitorização; Inspeção; Reabilitação.



## ABSTRACT

Cable-stayed bridges are widely utilized as a structural solution, now more than ever, given their capacity to overcome long spans, associated with the aesthetics of their structure. This is due to the evolution in their conception, specifically with regards to the cable systems.

Firstly, this thesis presents the evolution of structural systems of cable-stayed bridges, with an emphasis on Portuguese bridges. Secondly, the importance of periodic inspections and field monitoring systems is synthesized, with regards to their role on the prevention and/or detection of anomalies in bridges. In addition, the processes that lead to the deterioration of the cables are also addressed. The different processes of cable deterioration and substitution are then analyzed in detail, utilizing two case studies in Portugal, the Edgar Cardoso bridge (Figueira da Foz) and the Guadiana International bridge (Castro Marim), both with over 30 years since their date of construction. Throughout the case studies, the anomalies found during the latest periodic inspections, as well as the solutions applied for cable substitution are discussed in detail, in accordance with the structural specificities of each bridge. Lastly, a comparative analysis between the solutions used for each case study is presented, based on a non-linear structural analysis simulating the redistribution of axial forces associated with the removal of cables in each of the bridges.

Studies in this field are important in civil engineering, as they contribute to significantly increase the lifespan of structures, in addition to assuring safety.

**Keywords:** Cable-stayed bridges; Cables; Cable anomalies; Monitoring; Inspection; Rehabilitation.

# ÍNDICE

|          |                                                      |          |
|----------|------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                               | <b>1</b> |
| 1.1      | Enquadramento do trabalho.....                       | 1        |
| 1.2      | Objetivos da dissertação.....                        | 1        |
| 1.3      | Organização do documento.....                        | 2        |
| <b>2</b> | <b>RESENHA SOBRE AS PONTES DE TIRANTES .....</b>     | <b>3</b> |
| 2.1      | Considerações iniciais.....                          | 3        |
| 2.2      | Sistemas de atirantamento .....                      | 4        |
| 2.2.1    | Aspetos gerais .....                                 | 4        |
| 2.2.2    | Distribuição transversal dos tirantes .....          | 5        |
| 2.2.3    | Distribuição longitudinal dos tirantes.....          | 7        |
| 2.3      | Tipo de tirantes .....                               | 9        |
| 2.3.1    | Aspetos gerais .....                                 | 9        |
| 2.3.2    | Cordões em espiral.....                              | 9        |
| 2.3.3    | Cordões em paralelo .....                            | 10       |
| 2.3.4    | Cordões em "Locked Coil" .....                       | 11       |
| 2.3.5    | Ancoragens e selas.....                              | 11       |
| 2.4      | Torres.....                                          | 15       |
| 2.4.1    | Aspetos gerais .....                                 | 15       |
| 2.4.2    | Torres de fuste único, com dois pilares e em H ..... | 17       |

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.3    | Torres em A e Y invertido .....                                  | 18        |
| 2.4.4    | Torres em forma de $\Delta$ e de diamante.....                   | 19        |
| 2.5      | Tabuleiros .....                                                 | 19        |
| 2.5.1    | Aspetos gerais .....                                             | 19        |
| 2.5.2    | Tabuleiros de aço.....                                           | 19        |
| 2.5.3    | Tabuleiros de betão armado e pré-esforçado .....                 | 20        |
| 2.5.4    | Tabuleiros de estrutura mista .....                              | 20        |
| 2.5.5    | Secções transversais dos tabuleiros.....                         | 21        |
| 2.6      | Pontes de tirantes no estrangeiro e em Portugal.....             | 23        |
| 2.6.1    | Evolução das pontes de tirantes no estrangeiro.....              | 23        |
| 2.7      | Pontes de tirantes em Portugal.....                              | 30        |
| <b>3</b> | <b>OBSERVAÇÃO E ANOMALIAS DE TIRANTES DE PONTES .....</b>        | <b>32</b> |
| 3.1      | Considerações iniciais.....                                      | 32        |
| 3.2      | Monitorização estrutural .....                                   | 34        |
| 3.2.1    | Monitorização estática e dinâmica .....                          | 34        |
| 3.2.2    | Medição de rotações.....                                         | 35        |
| 3.2.3    | Medição de extensões .....                                       | 35        |
| 3.2.4    | Medição de temperatura .....                                     | 36        |
| 3.2.5    | Medição de humidade relativa do ar.....                          | 37        |
| 3.2.6    | Medição da velocidade e da direção do vento .....                | 37        |
| 3.2.7    | Medição da largura das juntas de dilatação .....                 | 38        |
| 3.2.8    | Medição das acelerações.....                                     | 38        |
| 3.2.9    | Medição da força nos tirantes .....                              | 39        |
| 3.2.10   | Unidades de controlo, aquisição e transmissão de dados .....     | 42        |
| 3.3      | Inspeções.....                                                   | 45        |
| 3.3.1    | Metodologias de inspeção .....                                   | 45        |
| 3.3.2    | Relatórios das inspeções .....                                   | 48        |
| 3.4      | Caracterização dos tipos de anomalias em tirantes de pontes..... | 50        |
| 3.5      | Anomalias de origem mecânica .....                               | 51        |

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.1    | Aspetos gerais .....                                             | 51        |
| 3.5.2    | Excesso de tensão .....                                          | 52        |
| 3.5.3    | Fadiga .....                                                     | 53        |
| 3.5.4    | Flexão e corte dos cordões.....                                  | 55        |
| 3.5.5    | Abrasão e batimento dos cordões .....                            | 55        |
| 3.5.6    | Oscilações e vibrações dos tirantes .....                        | 55        |
| 3.5.7    | Revestimento dos tirantes .....                                  | 56        |
| 3.6      | Anomalias de origem química.....                                 | 57        |
| 3.6.1    | Corrosão sob tensão .....                                        | 58        |
| 3.6.2    | Fragilização por hidrogénio .....                                | 58        |
| 3.6.3    | Corrosão por atrito .....                                        | 59        |
| 3.6.4    | Corrosão por fadiga .....                                        | 59        |
| 3.6.5    | Corrosão por agentes externos .....                              | 59        |
| 3.7      | Anomalias com origem em soluções construtivas.....               | 60        |
| <b>4</b> | <b>REABILITAÇÃO DOS TIRANTES DE DUAS PONTES PORTUGUESAS.....</b> | <b>61</b> |
| 4.1      | Considerações iniciais.....                                      | 61        |
| 4.2      | Ponte Edgar Cardoso .....                                        | 61        |
| 4.2.1    | Descrição geral da obra.....                                     | 61        |
| 4.2.2    | Anomalias nos tirantes .....                                     | 66        |
| 4.2.3    | Sistema de monitorização.....                                    | 67        |
| 4.2.4    | Proposta de substituição dos tirantes .....                      | 69        |
| 4.3      | Ponte Internacional do Guadiana .....                            | 77        |
| 4.3.1    | Descrição geral da obra.....                                     | 77        |
| 4.3.2    | Anomalias nos tirantes .....                                     | 79        |
| 4.3.3    | Sistema de monitorização.....                                    | 81        |
| 4.3.4    | Reabilitação dos tirantes.....                                   | 83        |
| 4.4      | Algumas comparações entre as duas pontes.....                    | 88        |
| 4.4.1    | Notas sobre as soluções de reabilitação dos tirantes .....       | 88        |
| 4.4.2    | Modelação estrutural para apoio às intervenções nas obras.....   | 89        |

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>         | <b>93</b> |
| 5.1 Contributos do trabalho realizado ..... | 93        |
| 5.2 Desenvolvimentos futuros .....          | 94        |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - Ponte Russky em Vladivostok, 2012 .....                                                  | 4  |
| Figura 2.2 - Ponte Hutong sobre o rio Yangtze, 2020 .....                                             | 4  |
| Figura 2.3 - Funcionamento estrutural dos elementos constituintes das pontes de tirantes .....        | 4  |
| Figura 2.4 - Configuração transversal dos tirantes em um plano central.....                           | 5  |
| Figura 2.5 - Configuração transversal dos tirantes em dois planos .....                               | 5  |
| Figura 2.6 - Efeito da torção no tabuleiro na distribuição dos tirantes num único plano central ..... | 6  |
| Figura 2.7 - Configuração transversal dos tirantes em três planos .....                               | 6  |
| Figura 2.8 - Tipos principais de distribuição longitudinal de tirantes em pontes.....                 | 7  |
| Figura 2.9 - Ponte Knee, Alemanha, com tirantes dispostos em harpa .....                              | 8  |
| Figura 2.10 - Arranjos dos cordões nos tirantes .....                                                 | 9  |
| Figura 2.11 - Cordões em espiral.....                                                                 | 10 |
| Figura 2.12 - Cordões em paralelo .....                                                               | 10 |
| Figura 2.13 - - Cordões em "locked-coil" .....                                                        | 11 |
| Figura 2.14 - Exemplo de um sistema de ancoragem de tirantes .....                                    | 12 |
| Figura 2.15 - Ancoragem em zinco.....                                                                 | 13 |
| Figura 2.16 - Ancoragem "Hi-Am" .....                                                                 | 13 |
| Figura 2.17 - Ancoragem no tabuleiro: encaixe "Hi-Am".....                                            | 13 |
| Figura 2.18 - Sistema de ancoragem no topo da torre do viaduto do Corgo .....                         | 14 |
| Figura 2.19 - Ancoragem cruzada na torre .....                                                        | 15 |
| Figura 2.20 - Ancoragem interior na torre .....                                                       | 15 |
| Figura 2.21 - Tipos estruturais de torres em pontes de tirantes.....                                  | 16 |
| Figura 2.22 - Ponte Oberkasselr, Dusseldorf, com torre em fuste único.....                            | 17 |
| Figura 2.23 - Ponte Golden Ears, Canadá, formada por dois pilares verticais .....                     | 17 |
| Figura 2.24 - Torres em forma de A .....                                                              | 18 |
| Figura 2.25 - Torres em forma de Y invertido .....                                                    | 18 |

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.26 - Ponte internacional sobre o rio Guadiana, com torre em forma de Y invertido                                    | 18 |
| Figura 2.27 - Ponte Arthur Ravenel, Carolina do Sul, EUA, com torre em forma de diamante                                     | 19 |
| Figura 2.28 - Ponte Knie, 1957, exemplo de ponte com o tabuleiro de aço                                                      | 20 |
| Figura 2.29 - Ponte Maracaibo, Venezuela, 1962, um dos primeiros exemplos de ponte de tirantes com tabuleiro de betão armado | 20 |
| Figura 2.30 - Ponte sobre o rio Hoogle, Calcutta 1992, com tabuleiro misto aço-betão                                         | 21 |
| Figura 2.31 - Secções transversais dos tabuleiros com suspensão central                                                      | 22 |
| Figura 2.32 - Secções transversais dos tabuleiros com suspensão lateral                                                      | 23 |
| Figura 2.33 - Desenho de uma ponte atirantada por Fausto Veranzio, no seu livro <i>Machinae Novae</i>                        | 24 |
| Figura 2.34 - Projeto de uma ponte atirantada, da autoria de Immanuel Löscher                                                | 24 |
| Figura 2.35 - Primeira ponte atirantada construída: Kings Meadow, 1817 (Stephenson, 1821 apud Svensson, 2012)                | 25 |
| Figura 2.36 - Ponte de Brooklyn em Nova Iorque, 1883, com tabuleiro híbrido (suspensão e atirantado)                         | 25 |
| Figura 2.37 - Primeira ponte atirantada moderna: Strömsund, 1956                                                             | 26 |
| Figura 2.38 - Primeira ponte atirantada moderna: Strömsund, 1956                                                             | 26 |
| Figura 2.39 - Ponte Donzère-Mondragon em França, 1952                                                                        | 26 |
| Figura 2.40 - Ponte Skarnsund - Noruega, 1991                                                                                | 28 |
| Figura 2.41 - Ponte Sutong Yangtze - China, 2008                                                                             | 28 |
| Figura 2.42 - Ponte Octávio Frias de Oliveira - Brasil, 2008                                                                 | 29 |
| Figura 2.43 - Ponte Margaret Hunt Hill - EUA, 2012                                                                           | 29 |
| Figura 2.44 - Cronologia de construção de algumas pontes de tirantes em Portugal                                             | 31 |
| Figura 3.1 - Componentes de um sistema de monitorização estrutural                                                           | 33 |
| Figura 3.2 - Exemplo de um clinómetro portátil                                                                               | 35 |
| Figura 3.3 - Exemplo de um clinómetro fixo                                                                                   | 35 |
| Figura 3.4 - Exemplo de um extensómetro de resistência elétrica                                                              | 36 |
| Figura 3.5 - Exemplo de um extensómetro de corda vibrante externo                                                            | 36 |
| Figura 3.6 - Exemplo de um extensómetro de fibra ótica                                                                       | 36 |
| Figura 3.7 - Exemplo de sensor de temperatura do tipo termopar                                                               | 36 |
| Figura 3.8 - Exemplo de sensor de temperatura de resistência elétrica                                                        | 36 |
| Figura 3.9 - Exemplo de sensor de temperatura de fibra ótica                                                                 | 36 |
| Figura 3.10 - Exemplo de um sensor de platina para a medição da temperatura e da humidade relativa do ar                     | 37 |

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.11 - Exemplo de um anemómetro em hélice para a medição do rumo e da velocidade horizontal do vento ..... | 38 |
| Figura 3.12 - Exemplo de um anemómetro de copos .....                                                             | 38 |
| Figura 3.13 - Exemplo de um anemómetro ultrassónico .....                                                         | 38 |
| Figura 3.14 - Exemplo de dispositivo para a medição das variações da abertura das juntas de dilatação.....        | 38 |
| Figura 3.15 - Exemplo de um acelerómetro piezoeléctrico.....                                                      | 39 |
| Figura 3.16 - Exemplo de um acelerómetro capacitivo .....                                                         | 39 |
| Figura 3.17 - Exemplo de um acelerómetro tipo force balance.....                                                  | 39 |
| Figura 3.18 - Fixação através de uma chapa metálica e braçadeiras .....                                           | 42 |
| Figura 3.19 - Esquema de aquisição da informação num sistema de monitorização .....                               | 43 |
| Figura 3.20 - Exemplo de um sistema de aquisição autónomo, da série DT515.....                                    | 43 |
| Figura 3.21 - Exemplo de um sistema de aquisição autónomo, do tipo CompactRio .....                               | 43 |
| Figura 3.22 - Exemplo de caixa com computador e subsistemas de aquisição.....                                     | 44 |
| Figura 3.23 - Exemplo de um computador utilizado para o sistema de aquisição (Advantech UNO-2484G).....           | 44 |
| Figura 3.24 - Exemplo de uma unidade de controlo do sistema de aquisição (Gantner) .....                          | 44 |
| Figura 3.25 - Exemplo de data logger (Gantner) .....                                                              | 45 |
| Figura 3.26 - Exemplo de Data logger (dataTaker) .....                                                            | 45 |
| Figura 3.27 - Exemplos de routers para ligação à Internet .....                                                   | 45 |
| Figura 3.28 - Equipamentos e técnicas de realização de inspeções em zonas de difícil acesso                       | 46 |
| Figura 3.29 - Drones utilizados em inspeções .....                                                                | 47 |
| Figura 3.30 - Exemplo de um robô utilizado para a realização de inspeções em pontes.....                          | 47 |
| Figura 3.31 - Componentes de uma obra de arte considerados no SGOA .....                                          | 48 |
| Figura 3.32 - Estados de conservação definidos no SGOA.....                                                       | 49 |
| Figura 3.33 - Classificação de ações nas estruturas e seus materiais (Fonte: Guia Técnico da EP, 2015).....       | 50 |
| Figura 3.34 - Fatores que podem contribuir para a diminuição da vida útil das pontes .....                        | 51 |
| Figura 3.35 - Exemplo de fios partidos junto à ancoragem dos tirantes no tabuleiro - 1/2.....                     | 52 |
| Figura 3.36 - Exemplo de fios partidos junto à ancoragem dos tirantes no tabuleiro - 2/2.....                     | 52 |
| Figura 3.37 - Exemplo de fios sem tensão junto à ancoragem dos tirantes no tabuleiro.....                         | 52 |
| Figura 3.38 - Fratura por fadiga de um fio de aço; nota-se uma superfície plana seguida de outra rugosa .....     | 54 |
| Figura 3.39 - Fratura por fadiga de um fio desgastado; nota-se a superfície plana seguida de outra rugosa .....   | 54 |
| Figura 3.40 - Vista em microscópio de um fio que sofreu rotura por fadiga .....                                   | 54 |

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.41 - Exemplo da inexistência ou ineficácia de dispositivos de centragem dos cabos                                             | 55 |
| Figura 3.42 - Exemplo de braçadeira solta permitindo oscilações dos tirantes devido ao vento .....                                     | 56 |
| Figura 3.43 - Destaque do revestimento do enrolamento de proteção dos tirantes.....                                                    | 56 |
| Figura 3.44 - Líquenes e fungos no revestimento do enrolamento de proteção dos tirantes ..                                             | 57 |
| Figura 3.45 - Exemplo de um tubo antivandalismo danificado.....                                                                        | 57 |
| Figura 3.46 - Gravidade de corrosão, em termos percentuais (0%, 40% e 60% respetivamente) .....                                        | 58 |
| Figura 3.47 - Processo autocatalítico numa picada de corrosão .....                                                                    | 59 |
| Figura 3.48 - Exemplo de infiltração de água na ancoragem do tirante no tabuleiro.....                                                 | 60 |
| Figura 4.1 - Ponte Edgar Cardoso. Vista geral .....                                                                                    | 62 |
| Figura 4.2 - Ponte Edgar Cardoso. Vista de um trecho do tabuleiro.....                                                                 | 62 |
| Figura 4.3 - Ponte Edgar Cardoso. Vista inferior do tabuleiro.....                                                                     | 63 |
| Figura 4.4 - Ponte Edgar Cardoso. Geometria e dimensões das torres (Rito <i>et al.</i> , 2005) .....                                   | 64 |
| Figura 4.5 - Ponte Edgar Cardoso. Vista da torre sul (Fonte: LNEC).....                                                                | 64 |
| Figura 4.6 - Ponte Edgar Cardoso. Selas de desvio dos tirantes no topo das torres .....                                                | 64 |
| Figura 4.7 - Ponte Edgar Cardoso. Ancoragens inferiores dos tirantes nas vigas principais .                                            | 64 |
| Figura 4.8 - Ponte Edgar Cardoso. Vista geral do viaduto de acesso norte .....                                                         | 65 |
| Figura 4.9 - Ponte Edgar Cardoso. Infiltração de água da chuva em ancoragem do tirante, ao nível do tabuleiro.....                     | 66 |
| Figura 4.10 - Ponte Edgar Cardoso. Descasque da camada de proteção dos fios e corrosão ..                                              | 66 |
| Figura 4.11 - Ponte Edgar Cardoso. Fios partidos em tirante e corrosão .....                                                           | 66 |
| Figura 4.12 - Ponte Edgar Cardoso. Descasque do revestimento e proteção e acumulação de líquenes .....                                 | 66 |
| Figura 4.13 - Ponte Edgar Cardoso. Humidade e fio partido em tirante.....                                                              | 67 |
| Figura 4.14 - Ponte Edgar Cardoso. Corrosão e descasque da camada de revestimento na sela de desvio de tirante, no topo da torre ..... | 67 |
| Figura 4.15 - Sistema de monitorização implementado na ponte Edgar Cardoso .....                                                       | 68 |
| Figura 4.16 - Ponte Edgar Cardoso. Numeração dos tirantes .....                                                                        | 69 |
| Figura 4.17 - Ponte Edgar Cardoso. Sela de desvio atual no topo da torre norte (montante) .                                            | 70 |
| Figura 4.18 - Ponte Edgar Cardoso. Ancoragem do atual tirante 1 no tabuleiro (pilar de transição P7).....                              | 71 |
| Figura 4.19 - Ponte Edgar Cardoso. Inserção do atual tirante 6, ao nível do tabuleiro .....                                            | 71 |
| Figura 4.20 - Ponte Edgar Cardoso. Ancoragem do atual tirante 6 no tabuleiro .....                                                     | 71 |
| Figura 4.21 - Ponte Edgar Cardoso. Selas existentes e selas provisórias no topo das torres ...                                         | 73 |
| Figura 4.22 - Ponte Edgar Cardoso. Alçado das selas provisórias no topo das torres .....                                               | 73 |

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.23 - Ponte Edgar Cardoso. Alçado transversal das peças de ancoragem definitivas no topo das torres .....                                                  | 74 |
| Figura 4.24 - Ponte Edgar Cardoso. Corte longitudinal pelas ancoragens definitivas no topo das torres .....                                                        | 75 |
| Figura 4.25 - Ponte Edgar Cardoso. Alçado longitudinal das ancoragens definitivas no topo das torres .....                                                         | 75 |
| Figura 4.26 - Ponte Edgar Cardoso. Corte longitudinal da viga do tabuleiro com as ancoragens provisórias (direita) e definitiva (esquerda) dos tirantes 2 e 5..... | 76 |
| Figura 4.27 - Ponte Edgar Cardoso. Alçado da ancoragem provisória no tabuleiro para o tirante 1.....                                                               | 76 |
| Figura 4.28 - Ponte Edgar Cardoso. Corte da ancoragem provisória no tabuleiro para o tirante 1.....                                                                | 76 |
| Figura 4.29 - Ponte Edgar Cardoso. Corte longitudinal com as ancoragens no tabuleiro do tirante 6, provisórias (inferior) e definitivas (esquerda) .....           | 77 |
| Figura 4.30 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista geral de jusante.....                                                                                         | 77 |
| Figura 4.31 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista inferior do tabuleiro .....                                                                                   | 78 |
| Figura 4.32 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista da torre do lado da Espanha.....                                                                              | 79 |
| Figura 4.33 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista das entradas dos tirantes na torre.....                                                                       | 79 |
| Figura 4.34 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista geral do tubo antivandalismo no trecho inferior dos tirantes .....                                            | 79 |
| Figura 4.35 - Ponte Internacional do Guadiana. Cordão partido de um dos tirantes, junto à ancoragem na torre.....                                                  | 80 |
| Figura 4.36 - Ponte Internacional do Guadiana. Degradação do revestimento dos cordões... 80                                                                        |    |
| Figura 4.37 - Ponte Internacional do Guadiana. Vestígios de água e corrosão na proteção de ancoragem .....                                                         | 80 |
| Figura 4.38 - Ponte Internacional do Guadiana. Perda de tensão (flecha no tirante) .....                                                                           | 80 |
| Figura 4.39 - Ponte Internacional do Guadiana. Corrosão no sistema de vedação da ancoragem .....                                                                   | 80 |
| Figura 4.40 - Ponte Internacional do Guadiana. Fios expostos junto à ancoragem .....                                                                               | 80 |
| Figura 4.41 - Ponte Internacional do Guadiana. Humidade e corrosão em ancoragem no tabuleiro .....                                                                 | 81 |
| Figura 4.42 - Sistema de monitorização implementado na ponte Internacional do Guadiana                                                                             | 82 |
| Figura 4.43 - Ponte Internacional do Guadiana. Retirada de tensão de um tirante .....                                                                              | 83 |
| Figura 4.44 - Ponte Internacional do Guadiana. Ancoragens de tirante no tabuleiro após a remoção.....                                                              | 83 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.45 - Ponte Internacional do Guadiana. trabalhos para aumento do diâmetro no tudo da ancoragem no tabuleiro.....  | 84 |
| Figura 4.46 - Ponte Internacional do Guadiana. Placa metálica adicional na ancoragem no tabuleiro .....                   | 84 |
| Figura 4.47 - Ponte Internacional do Guadiana. Sistema de ancoragem DYNA Grip .....                                       | 85 |
| Figura 4.48 - Ponte Internacional do Guadiana. Tubos HDPE (Polietileno) .....                                             | 86 |
| Figura 4.49 - Ponte Internacional do Guadiana. Início do içamento do tudo de revestimento                                 | 86 |
| Figura 4.50 - Ponte Internacional do Guadiana. Instalação de novos cordões nos tirantes a partir do tabuleiro .....       | 87 |
| Figura 4.51 - Ponte Internacional do Guadiana. Tensionamento dos cabos com o sistema ConTen.....                          | 87 |
| Figura 4.52 - Ponte Internacional do Guadiana. Exemplo de resultados gráficos da monitorização da força nos cordões ..... | 88 |
| Figura 4.53 - Modelo tridimensional da ponte Edgar Cardoso ( <i>SAP2000</i> ) .....                                       | 89 |
| Figura 4.54 - Modelo tridimensional da ponte Internacional do Guadiana ( <i>SAP2000</i> ).....                            | 90 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Pontes de tirantes com maiores vãos, construídas desde 1952 .....                                                                            | 29 |
| Tabela 2 - Principais pontes de tirantes em Portugal .....                                                                                              | 30 |
| Tabela 3 - Conjunto de tirantes removidos dos vãos laterais do tabuleiro e acréscimo de força axial nos restantes tirantes da ponte Edgar Cardoso ..... | 91 |
| Tabela 4 - Conjunto de tirantes removidos do vão central do tabuleiro e acréscimo de força axial nos restantes tirantes da ponte Edgar Cardoso .....    | 91 |
| Tabela 5 - Conjunto de tirantes removidos e acréscimo de força axial nos restantes tirantes da ponte Internacional do Guadiana .....                    | 92 |



# INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do trabalho

As pontes de tirantes são estruturas esbeltas capazes de vencer atualmente grandes vãos, dada a evolução que se tem verificado, quer na sua conceção, quer nos sistemas de atirantamento disponíveis.

A primeira ponte de tirantes foi construída na Escócia, no século XIX. Em Portugal, a primeira realização, a ponte Edgar Cardoso na Figueira da Foz, data do início da década de 80 do século XX, a que se seguiram muitas outras. As pontes de tirantes existentes correspondem a diversas soluções construtivas e a diferentes tipologias estruturais, em consequência da evolução tecnológica verificada no mundo moderno [1,2].

Em Portugal existe um número considerável de pontes, rodoviárias ou ferroviárias, de diferentes tipologias, que são vitais para o país, em termos sociais e económicos. Estas estruturas requerem acompanhamento e conservação, ou mesmo intervenções de reparação e de reforço, por se terem deteriorado ou por terem de suportar cargas de valor superior às previstas no seu projeto. Algumas destas pontes são atirantadas, sendo que as anomalias que têm experimentado, designadamente nos tirantes, estão maioritariamente relacionadas com degradações inerentes à natureza do próprio material (aço) e com os sistemas de proteção e ancoragem, que sofreram muito melhoramentos em relação à época em que foram projetadas as primeiras pontes de tirantes portuguesas.

Neste contexto, como algumas das pontes de tirantes portuguesas têm mais de 30 anos e apresentam anomalias cuja correção é necessário realizar, por forma a que continuem a ser utilizadas em boas condições de funcionalidade e de segurança. Muitas das anomalias verificadas dizem respeito aos tirantes, pelo que importa estudar os problemas associados à deterioração deste tipo de elementos em pontes.

## 1.2 Objetivos da dissertação

Na presente dissertação pretende-se abordar a evolução dos sistemas estruturais de pontes de tirantes utilizados e fazer uma síntese dos conhecimentos relativos aos processos de degradação dos tirantes, em particular para o caso de Portugal.

Serão apresentadas as metodologias de deteção de deficiências nos sistemas de atirantamento, no âmbito da observação das obras, com a finalidade de identificar atempadamente as anomalias e prevenir as eventuais consequências em termos de segurança.

Apresentam-se, como casos de estudo, duas importantes pontes de tirantes portuguesas, a ponte Edgar Cardoso, na Figueira da Foz, e a ponte Internacional do Guadiana, em Castro Marim. Os tirantes destas obras sofreram deterioração devido a diferentes causas, pelo que se apresentam as principais anomalias encontradas e as respetivas soluções de reabilitação.

### **1.3 Organização do documento**

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, sendo o *Capítulo 1* a presente Introdução.

No *Capítulo 2* faz-se uma resenha sobre as pontes de tirantes, que inclui uma introdução sobre os aspetos gerais destas pontes de tirantes e dos tipos de suspensão. Caracterizam-se os sistemas que compõem as pontes, designadamente as tipologias de atirantamento, ancoragens, torres e tabuleiros. Apresenta-se também uma síntese histórica da construção das pontes de tirantes no estrangeiro e em Portugal, incluindo a evolução dos vãos ao longo do tempo e listas das principais obras construídas.

No *Capítulo 3* apresentam-se os aspetos relevantes da observação de pontes e as principais anomalias verificadas nos tirantes. Referem-se, em particular, os métodos de monitorização estática e dinâmica e as inspeções para detetar e acompanhar essas anomalias. As anomalias são caracterizadas, enquadrando as suas principais causas, designadamente as de origem química, mecânica, deficiências construtivas ou utilização de soluções que não garantem a proteção dos tirantes.

No *Capítulo 4* apresentam-se os dois casos de estudo de pontes portuguesas com tirantes deteriorados, a ponte Edgar Cardoso na Figueira da Foz e ponte Internacional do Guadiana, em Castro Marim. Faz-se uma breve descrição destas pontes e referem-se os aspetos particulares das avarias dos tirantes de cada uma delas, bem como a solução de reabilitação de cada um desses sistemas. Termina-se com uma breve comparação da sensibilidade estrutural das duas pontes no que respeita ao comportamento dos tirantes, com o auxílio de modelos tridimensionais utilizando o programa *SAP2000*.

No *Capítulo 5* apresentam-se as principais conclusões dos estudos apresentados e fazem-se algumas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

## RESENHA SOBRE AS PONTES DE TIRANTES

### 2.1 Considerações iniciais

As pontes são construções destinadas a estabelecer a continuidade de uma via, quando existe um obstáculo natural, como um braço de mar, um rio ou uma depressão no terreno, por exemplo. No que diz respeito às pontes de tirantes, são soluções atualmente muito utilizadas porque são elegantes e eficazes do ponto de vista estrutural, numa gama de vãos muito larga, compreendida entre cerca de 50 m e 1000 m [3].

O sistema estrutural de pontes de tirantes é constituído pela conjugação de elementos que desempenham funções específicas. A superestrutura deste tipo de ponte é composta pelo tabuleiro, cabos de aço tracionados (tirantes), torres e pilares. O tabuleiro fica suspenso pelos tirantes, que transmitem as forças a uma ou mais torres. Os tirantes são constituídos, em regra, por cabos de aço de alta resistência [4].

As pontes de tirantes podem vencer grandes vãos. A extensão do vão principal pode variar conforme a conceção e as características de cada ponte. Em Portugal, existem pontes com vãos centrais de cerca de 300 m de comprimento. De acordo com a *Structurae (International Database and Gallery of Structures)*, a ponte de tirantes com o vão principal de maior extensão é a ponte *Rusky* (Rússia), com 1104 m de vão central e um comprimento total de 1885,53 m, construída em 2012 (Figura 2.1) [3]. Em segundo lugar está a ponte *Hutong* sobre o rio Yangtze, na China, com vão principal de 1092 m, comprimento total de 2300 m e conclusão em 2020 (Figura 2.2) [3].

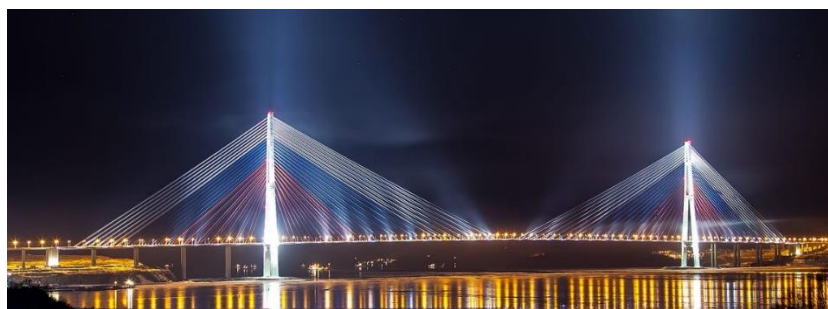


Figura 2.1 - Ponte Russky em Vladivostok, 2012



Figura 2.2 - Ponte Hutong sobre o rio Yangtze, 2020

## 2.2 Sistemas de atirantamento

### 2.2.1 Aspetos gerais

O sistema de atirantamento é formado pelo grupo de cabos que garantem a transferência das cargas do tabuleiro para as torres e, por conseguinte, constituem uma componente fundamental de uma ponte de tirantes [5,6]. Nos sistemas de tirantes individualiza-se, em regra, a ancoragem, o tensionamento e a proteção (Figura 2.3) [4].

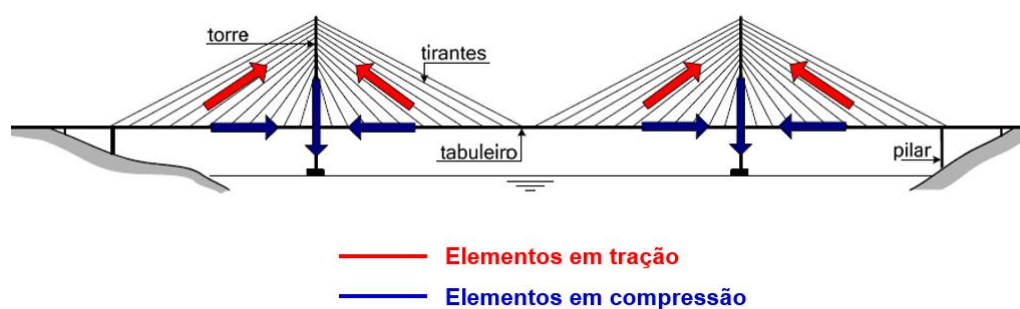


Figura 2.3 - Funcionamento estrutural dos elementos constituintes das pontes de tirantes

O sistema de ancoragem serve para amarrar os tirantes nas torres e no tabuleiro, pelo que deve ter elevada capacidade de resistência aos esforços proveniente dos cabos. Além

disso, deve ser projetado de forma a permitir a manutenção futura, dado que o seu correto desempenho interfere diretamente no funcionamento dos cabos e da ponte como um todo.

A proteção envolve os cabos e deve ter características mecânicas capazes de resistir aos agentes climáticos e ambientais, fruto da incidência de raios ultravioletas, cloretos provenientes da água do mar, ácidos presentes na chuva, etc. Assim, a proteção evita a corrosão e a deterioração dos cabos. Também são utilizados tubos antivandalismo nas extremidades inferiores, numa altura aproximada de 3 a 5 m, para proteger os tirantes de atos que possam danificar os cabos [7].

Os tirantes, como elementos tensionados, transferem os esforços do tabuleiro para as torres. A escolha dos tirantes e o seus arranjos transversal e longitudinal dependem das características gerais da própria ponte ou viaduto e das propriedades estruturais dos próprios tirantes.

### 2.2.2 Distribuição transversal dos tirantes

A suspensão do tabuleiro pelos tirantes pode ser realizada num ou em múltiplos planos, como é ilustrado Figura 2.4 e Figura 2.5 [9]. A distribuição transversal dos cabos depende de vários fatores e opções, designadamente da geometria do tabuleiro e das torres, apresentando vantagens e desvantagens em termos estruturais e estéticos [8].

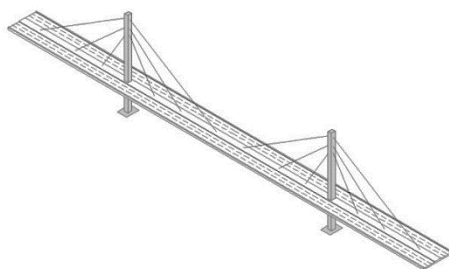


Figura 2.4 - Configuração transversal dos tirantes em um plano central

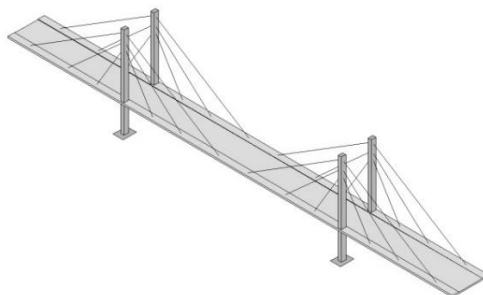


Figura 2.5 - Configuração transversal dos tirantes em dois planos

O uso de um plano central de cabos tem vantagens estéticas, visto que as estruturas podem ser mais elegantes. Porém, do ponto de vista estrutural, apresenta desvantagens em relação a dois planos de suspensão, devido aos esforços de torção que se geram no tabuleiro, em consequência das ações excêntricas das sobrecargas (Figura 2.6) [9]. Neste tipo de geometria os tirantes e os sistemas de ancoragem são mais robustos pois as forças transmitidas pelo tabuleiro são suportadas por um único plano resistente [9].

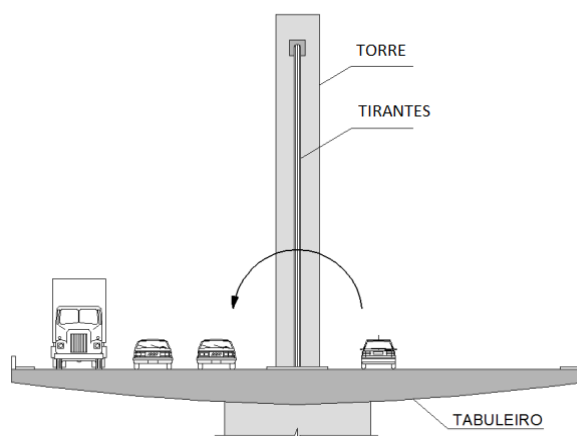


Figura 2.6 - Efeito da torção no tabuleiro na distribuição dos tirantes num único plano central

Na maior parte das pontes utilizam-se dois planos de suspensão, com vista a tornar o tabuleiro mais esbelto e a distribuir melhor os esforços pelos tirantes. Nesta situação, os esforços no tabuleiro são predominantemente de flexão [9].

No caso de tabuleiros muito largos, é possível usar três ou mais planos de tirantes, com o objetivo de reduzir os esforços transversais no tabuleiro. Porém, esta solução é pouco usada (Figura 2.7) [9].

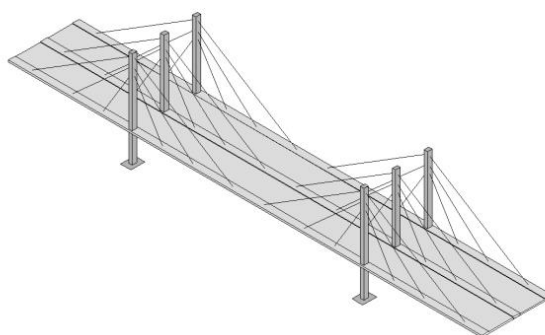


Figura 2.7 - Configuração transversal dos tirantes em três planos

A suspensão do tabuleiro pelos tirantes pode ser total ou parcial, consoante a solução estrutural escolhida. Na suspensão parcial as torres dão também um apoio direto ao tabuleiro.

### 2.2.3 Distribuição longitudinal dos tirantes

Os tirantes podem ter arranjos longitudinais em conformidade com a solução estrutural escolhida. Os arranjos mais comuns são em harpa (tirantes paralelos), em leque (tirantes convergentes no topo da torre) e em semi-leque, que é o mais comum [2]. Em alguns casos pode também usar-se um arranjo do tipo assimétrico (Figura 2.8) [4].

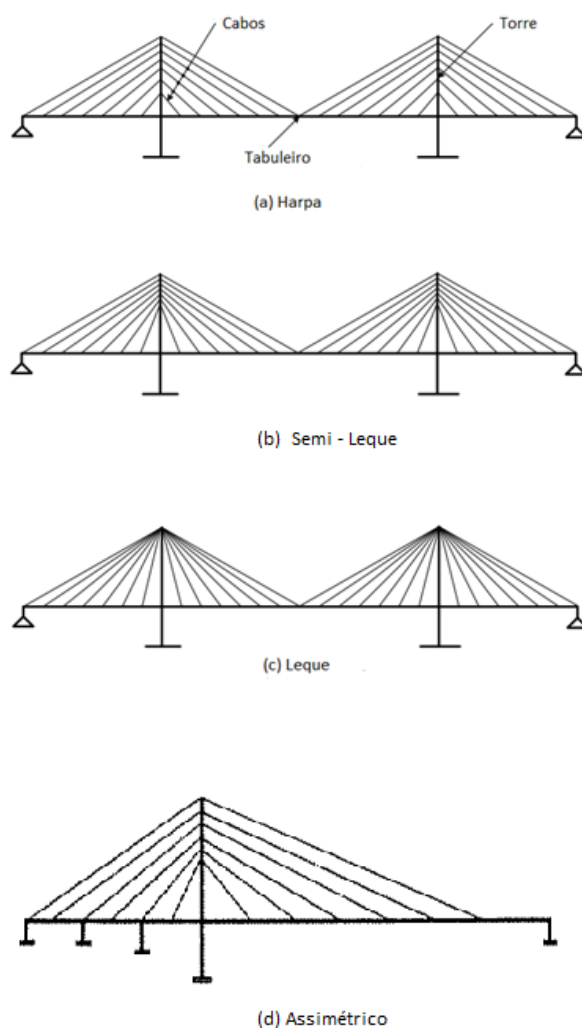


Figura 2.8 - Tipos principais de distribuição longitudinal de tirantes em pontes

Na configuração em leque (Figura 2.8(c)), todos os tirantes estão ancorados numa única secção no topo da torre. Segundo Leonhardt [12], a concentração de ancoragens causa dificuldades estruturais quando se tem um número grande de tirantes. Este tipo de disposição dos

tirantes é vantajoso do ponto de vista estrutural pois maximiza a componente vertical das forças, resultando numa menor seção transversal dos cabos, em comparação com os outros arranjos. A componente horizontal da força dos cabos é também menor do que com um arranjo em harpa [8].

Na configuração em harpa as ancoragens dos tirantes estão distribuídas ao longo da torre, através de espaçamentos iguais (Figura 2.8(a)), sendo os tirantes paralelos entre si. Trata-se de uma solução bem aceite do ponto de vista estético e por isso várias pontes foram concebidas utilizando esta geometria. Contudo, não são as pontes mais eficientes em termos estruturais e económicos, uma vez que este sistema requer mais aço para os cabos, gera compressões maiores no tabuleiro e produz momentos fletores na torre para cargas assimétricas [10]. Na Figura 2.9 [11] apresenta-se uma vista da ponte Knee, na Alemanha, que tem os tirantes dispostos em harpa.



Figura 2.9 - Ponte Knee, Alemanha, com tirantes dispostos em harpa

A configuração em semi-leque (Figura 2.8(b)) é a solução prática mais vantajosa, em que as ancoragens dos tirantes são distribuídas no trecho superior da torre. Trata-se de uma boa solução global do ponto de vista estético e estrutural. Ao distribuir os tirantes na parte superior da torre é possível ter uma boa arrumação das ancoragens sem reduzir a eficiência do sistema [12].

Por fim, em função de condicionalismos topográficos e/ou de considerações estéticas, pode ainda ser adotada uma configuração assimétrica. Este tipo de arranjo é escolhido quando se pretende utilizar um único vão. Segundo Bernard *et al.* (1988) [12], com o objetivo de reduzir o número de tirantes necessários ou as suas secções transversais, uma inclinação de  $45^\circ$  é uma solução ótima (Figura 2.8(d)) [12].

Segundo Leonhardt *et al.* (1987) [10], as secções dos cabos diminuem com o aumento da altura da torre acima do tabuleiro, já que aumenta a inclinação dos tirantes.

## 2.3 Tipo de tirantes

### 2.3.1 Aspetos gerais

Os tirantes são, como referido, elementos estruturais determinantes. Eles devem ser duráveis, apresentar resistência contra a fadiga e ser adequadamente protegidos contra a corrosão, especialmente em ambientes mais agressivos, como por exemplo, perto do mar. Os cabos são constituídos por cordões, que por sua vez são um conjunto de fios de aço.

De acordo com Caetano, 2000 (Figura 2.10) [13], o tirante é composto por um ou mais cordões que podem ser dispostos em espiral (a), em paralelo (b) ou com a configuração "locked coil" (c). O tipo de sistema a ser adotado depende das características mecânicas e estruturais, destacando-se a importância do módulo de elasticidade, da resistência à tração, da durabilidade e do tipo de ancoragem [13].

Cordões em espiral



Cordões em paralelo



Cordões em "Locked coil"



Figura 2.10 - Arranjos dos cordões nos tirantes

### 2.3.2 Cordões em espiral

Os cordões em espiral são compostos por sete fios circulares galvanizados, com diâmetro de aproximadamente 13 mm a 18 mm. Os fios são posicionados de maneira helicoidal em torno de um fio central. Com o objetivo de reduzir as forças de atrito internas quando o cabo é tensionado, os fios são posicionados em várias camadas. As forças nos cabos devem ser estudadas para se evitar a perda da resistência por fadiga. O conjunto de cordões pode tornar-se mais sensível à corrosão, pois para uma determinada secção transversal, o perímetro de

uma secção constituída por múltiplos fios é maior do que o de uma secção com um único elemento circular (Figura 2.11) [8].

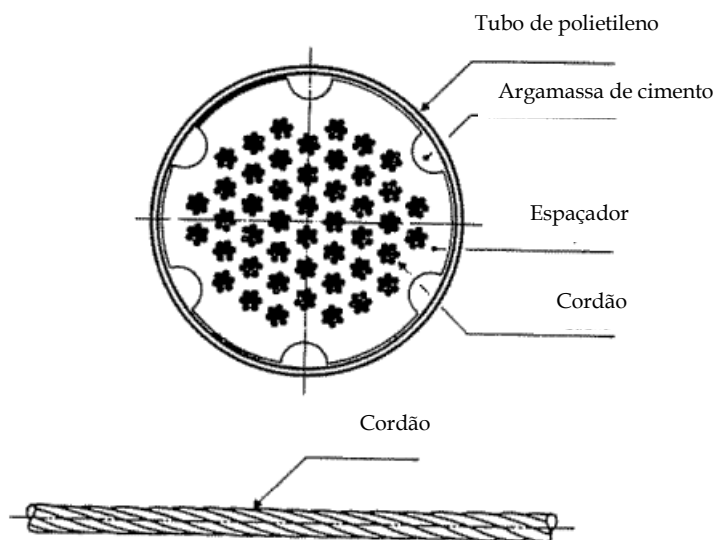


Figura 2.11 - Cordões em espiral

### 2.3.3 Cordões em paralelo

Os cordões em paralelo são compostos por conjuntos de fios de aço galvanizado, com diâmetros aproximados de 6 a 7 mm. Formam uma seção hexagonal e são posicionados de forma paralela, tendo alta resistência à fadiga. Os fios de aço são colocados em tubos metálicos ou de polietileno, geralmente injetados com uma argamassa de cimento após a montagem (Figura 2.12) [8].

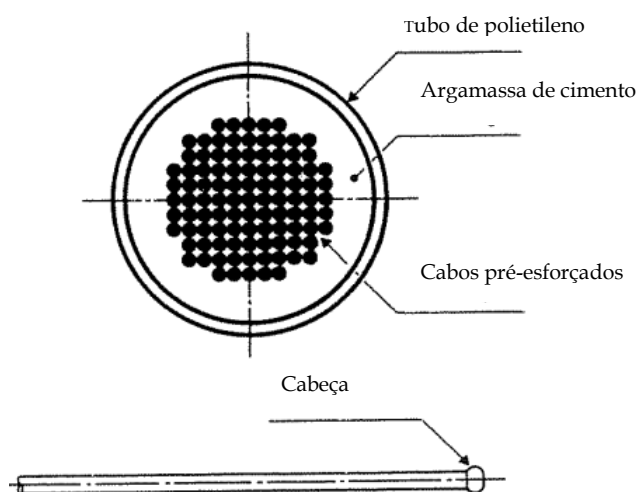


Figura 2.12 - Cordões em paralelo

### 2.3.4 Cordões em "Locked Coil"

Os cordões em "*locked coil*" (Figura 2.13) [8] são formados por camadas sucessivas ao redor do núcleo, com um formato em espiral. As camadas exteriores são compostas por fios em forma de T ou Z, com diâmetro variável entre 30 e 150 mm. As vantagens deste tipo de cordão prendem-se com a facilidade de montagem, economia decorrente da dispensa de tubos e de calda de cimento, do espaço de ancoragem reduzido e da facilidade de instalação nas selas de desvio [8].

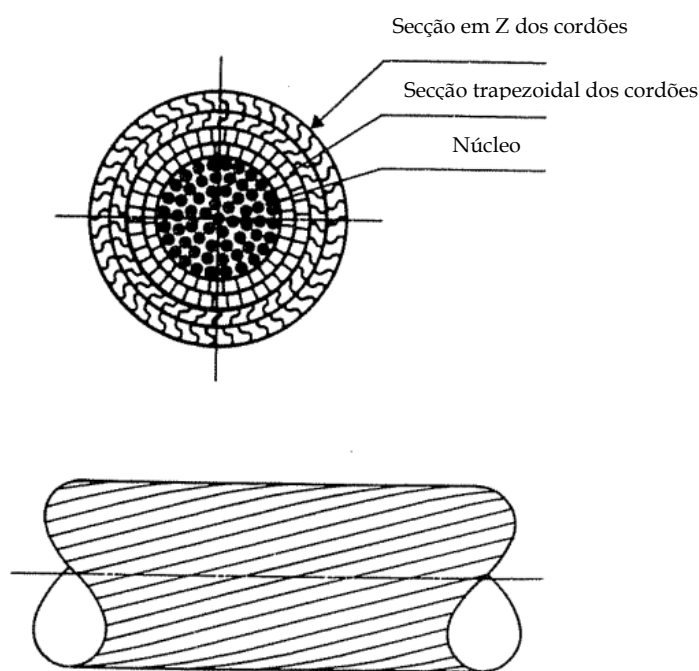


Figura 2.13 -- Cordões em "*locked-coil*"

Para proteção contra a corrosão, um tubo de polietileno em redor dos fios é a solução ideal, devido à sua impermeabilidade à água, líquida ou em vapor. Além do material ter elevada resistência em ambientes agressivos, é resistente aos raios ultravioleta. Deve ser utilizado um polietileno com boa resistência mecânica, para se evitar a fratura. A única desvantagem deste tipo de material é de natureza estética, uma vez que é preto. No entanto, podem ser usadas fitas ou realizadas pinturas na face exterior [13].

### 2.3.5 Ancoragens e selas

As ancoragens são os elementos para transferir os esforços nas extremidades dos cabos. Devem ser projetadas considerando uma resistência mecânica elevada, resistência à fadiga e resistência à corrosão. São peças que requerem manutenção, pelo que devem ser constituídas por elementos que facilitem a manutenção e a substituição dos tirantes, sem que seja necessário

interditar a utilização da ponte. A ancoragem deve ainda incluir amortecedores para evitar oscilações de ressonância dos cabos, causadas pela ação do vento.

A ancoragem dos tirantes de pontes é composta por duas partes principais: a cabeça da ancoragem, responsável pela transmissão de força, e a zona de transição, onde os arranjos dos cabos se modificam para encaixar no sistema [7]. Na Figura 2.14 [14] apresenta-se o exemplo de uma ancoragem Freyssinet (empresa que desenvolveu, em 1976, o sistema de múltiplos cabos paralelos [14]).

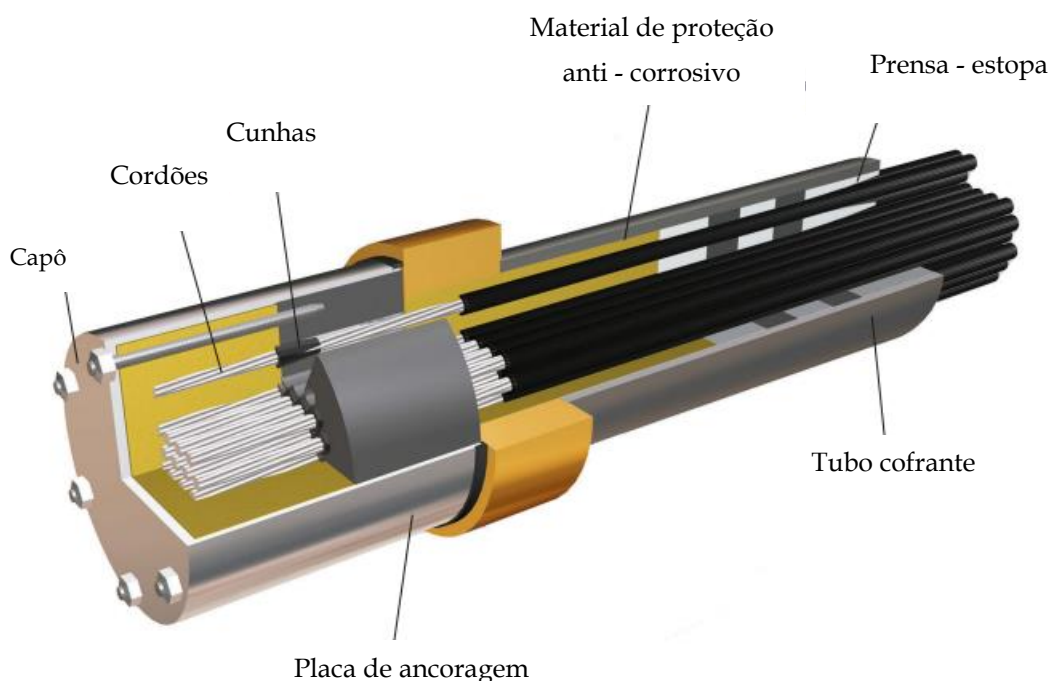


Figura 2.14 - Exemplo de um sistema de ancoragem de tirantes

#### 2.3.5.1 Ancoragem no tabuleiro

A ancoragem no tabuleiro pode ser feita de duas maneiras, através de encaixe em zinco ou de encaixe tipo "Hi-Am" (High Amplitude). O primeiro consiste numa ancoragem feita por um método convencional: o cabo é fixo numa cavidade preenchida com minerais e fusões metálicas com zinco, cobre e alumínio (Figura 2.15) [13]. No segundo tipo (Figura 2.16 e Figura 2.17) [10], a ancoragem, desenvolvida pela firma suíça BBR, atinge temperaturas menores durante a fundição dos materiais, permitindo assim melhorar a resistência à fadiga [15].

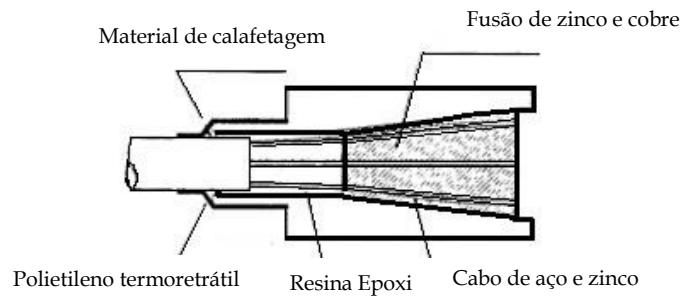


Figura 2.15 - Ancoragem em zinco

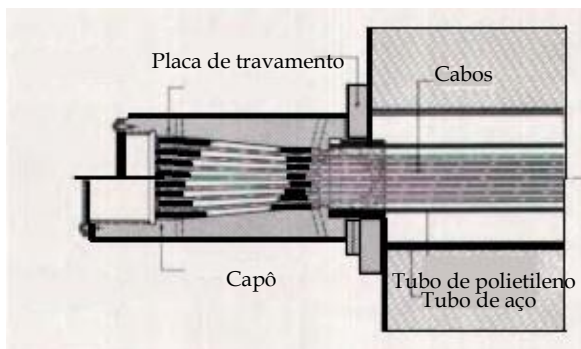


Figura 2.16 - Ancoragem "Hi-Am"



Figura 2.17 - Ancoragem no tabuleiro: encaixe "Hi-Am"

### 2.3.5.2 Ancoragem na torre

Algumas pontes foram projetadas com continuidade de cabos em selas de desvio no topo da torre, como é o caso da ponte Figueira da Foz. Porém, segundo Leonhardt [10], este tipo de ancoragem deve ser evitado pois a sua substituição pode ser muito difícil.

A ancoragem na torre pode também ser projetada com acopladores, como é o caso do viaduto do Corgo (Vila Real), por exemplo. Este tipo de sela apresenta algumas vantagens, pois não funciona por atrito e não é suscetível à fadiga. No caso de substituição de um tirante, não obriga à substituição do tirante do outro lado da sela [16]. É um tipo de sela constituído por um cabo de pré-esforço no topo da torre, que une as extremidades esquerda e direita dos tirantes (Figura 2.18) [16].

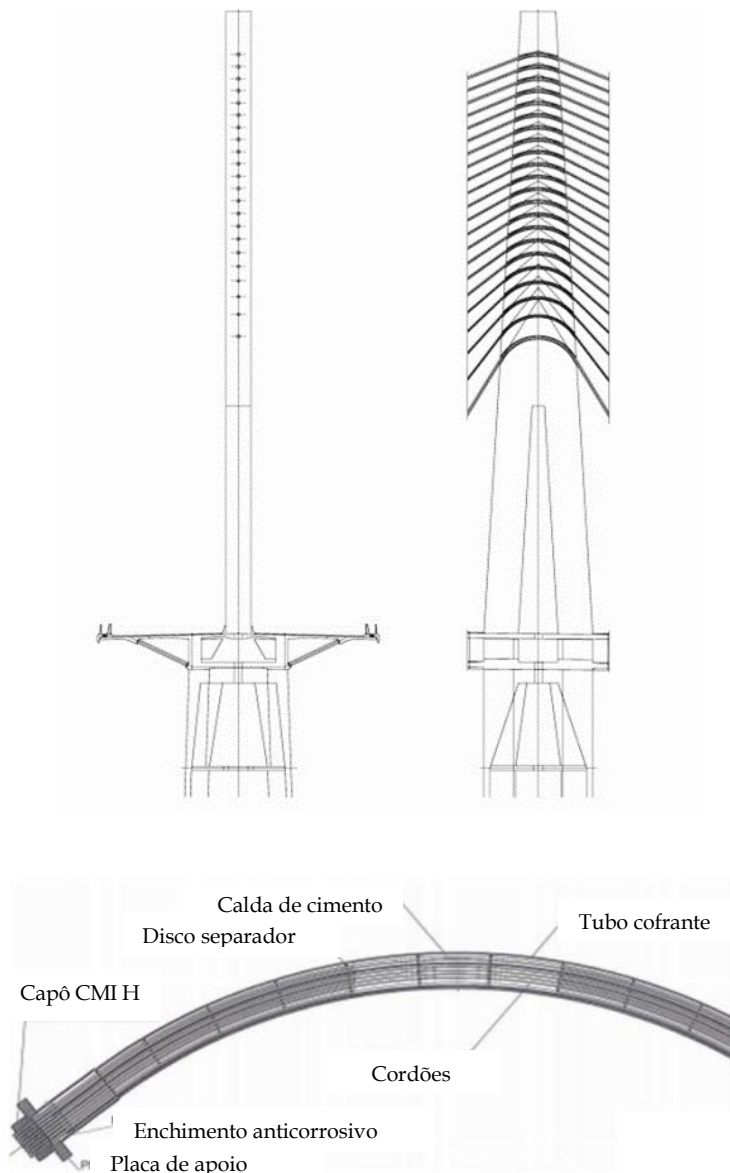


Figura 2.18 - Sistema de ancoragem no topo da torre do viaduto do Corgo

Segundo Leonhardt [10], é preferível ancorar os cabos individualmente em cada um dos lados e projetar dispositivos para transferir a componente horizontal das forças do cabo através da torre. Quando possível, as ancoragens devem convergir num ponto único, de tal modo que as suas componentes horizontais se equilibrem, transmitindo à torre o mínimo de forças horizontais, minimizando assim os seus esforços de flexão. É importante ressaltar que os cabos devem estar facilmente acessíveis, para realizar reparações e substituições [10].

A solução mais simples é apresentada na Figura 2.19 [10], em que os cabos se cruzam em tubos de aço. Na maioria das pontes, uma vez que as torres de betão armado geralmente

têm secção oca, é prático dispor as ancoragens no interior, tal como é mostrado na Figura 2.20 [10]. A componente horizontal das forças nos cabos é transferida para as paredes da torre por barras pré-esforçadas. Todas as ancoragens são facilmente acessíveis. Deve assim ser garantido um espaço suficiente para utilizar um macaco para ajustar as forças nos cabos, o que pode ser feito mais facilmente do que nas ancoragens do tabuleiro. No final do tubo de aço existe geralmente uma almofada de elastómero e uma manga [10]. Refere-se também a utilização de um caixão metálico para a transferência das forças, solidarizado à estrutura tubular do mastro.

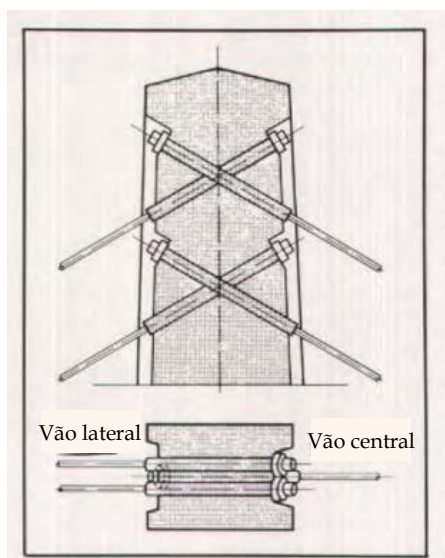


Figura 2.19 - Ancoragem cruzada na torre

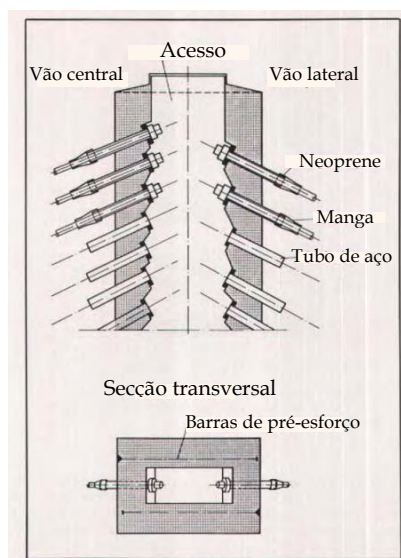


Figura 2.20 - Ancoragem interior na torre

## 2.4 Torres

### 2.4.1 Aspetos gerais

As torres são os elementos estruturais das pontes de tirantes onde estão ancorados os tirantes. Têm como função principal transferir a componente vertical da força dos cabos para a fundação, podendo ainda dar apoio direto ao tabuleiro. A estética das torres é preponderante na elegância das pontes de tirantes.

A geometria das torres é estudada tendo em consideração o funcionamento estrutural da ponte e a sua estética global. A geometria depende de condições locais, dos vãos da ponte, da altura disponível para as próprias torres, do tipo do sistema de atirantamento, do sistema de suspensão do tabuleiro (central ou lateral), da tipologia estrutural do tabuleiro e do número e espaçamento dos tirantes [8,13].

Segundo Walther, na maioria das pontes de tirantes têm sido adotadas torres de betão armado. Quanto à sua geometria, as torres das pontes de tirantes podem agrupar-se em (Figura 2.21) [13]:

- Torres com fuste único vertical ou inclinado, designadas também por mastros (a);
- Dois pilares verticais ligados ao nível do tabuleiro (b);
- Torres em forma de H (c, d, e, f);
- Torres em forma de Y invertido (g);
- Torres em forma de A (h);
- Torres em forma de  $\Delta$  (i);
- Torres em forma de diamante (j);
- Torres em forma de diamante com contraventamento no topo (k).

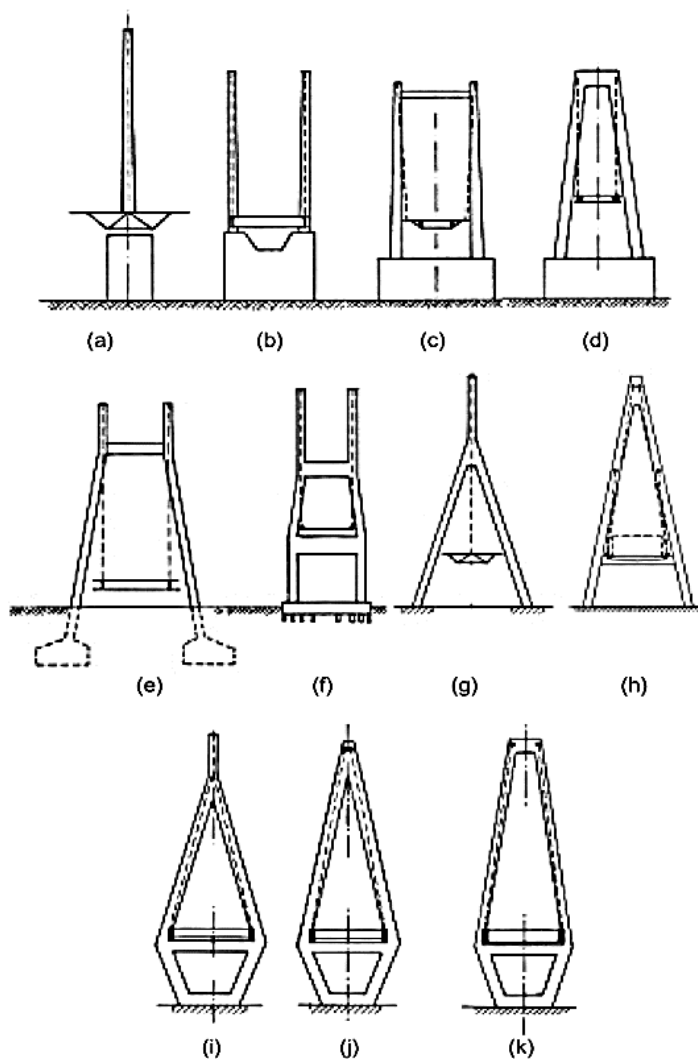


Figura 2.21 - Tipos estruturais de torres em pontes de tirantes

## 2.4.2 Torres de fuste único, com dois pilares e em H

Em pontes com suspensão central, a forma mais simples das torres é um único fuste vertical ou inclinado, como é o caso da ponte Oberkassel, na Alemanha, representada na Figura 2.22 [3].



Figura 2.22 - Ponte Oberkassel, Dusseldorf, com torre em fuste único

Segundo Walther, quando a estrutura tem dimensões moderadas, a torre pode ser construída com dois pilares verticais independentes. Com tirantes em planos verticais, não se geram forças transversais na suspensão do tabuleiro. A ponte Golden Ears (Canadá) é um exemplo de uma torre com dois pilares verticais (Figura 2.23) [3]. Os dois pilares são contraventados transversalmente com uma viga, no caso de estruturas maiores e torres mais altas [8].

Quando os tirantes não estão dispostos em planos verticais, podem ser utilizadas torres em formato de H.



Figura 2.23 - Ponte Golden Ears, Canadá, formada por dois pilares verticais

### 2.4.3 Torres em A e Y invertido

Ainda de acordo com Walther, em estruturas de grandes vãos, a altura do pilar acima do tabuleiro é suficiente, em geral, para permitir inclinar transversalmente as pernas e juntá-las no topo sem reduzir a distância ao nível do tabuleiro. Desta forma garante-se a resistência para os esforços provenientes dos tirantes e do vento. Como a torre não atravessa o tabuleiro, é possível reduzir a largura do separador central e assim otimizar as formas do tabuleiro. Nesta configuração destacam-se as torres em A (Figura 2.24) [8], Y invertido (Figura 2.25 e Figura 2.26) [6] e em diamante [8].

Caso seja adotada a geometria em A, para se ter um bom comportamento face às cargas assimétricas, os tirantes devem convergir no topo da torre, fazendo com que a configuração dos tirantes seja em leque. Para que seja possível utilizar uma configuração em semi-leque, com vantagens em termos de simplicidade na ancoragem dos tirantes nas torres, pode optar-se por uma torre em forma de Y invertido [6].

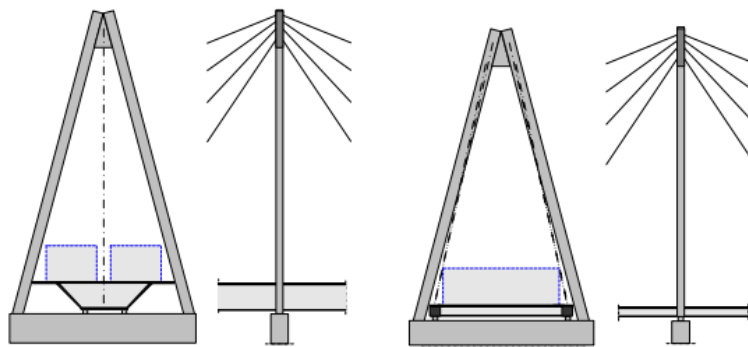


Figura 2.24 - Torres em forma de A

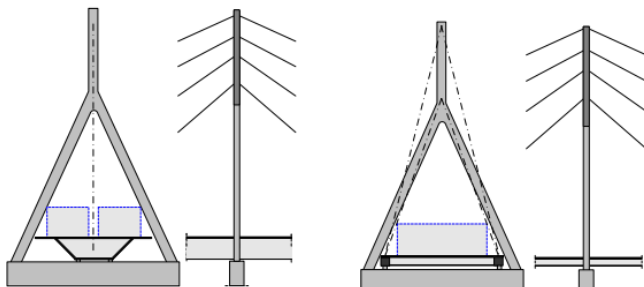


Figura 2.25 - Torres em forma de Y invertido



Figura 2.26 - Ponte internacional sobre o rio Guadiana, com torre em forma de Y invertido

#### 2.4.4 Torres em forma de $\Delta$ e de diamante

A desvantagem dos formatos em Y invertido e em A é a necessidade de construção de blocos de fundação de grandes dimensões, devido à distância, na direção transversal, entre as pernas das torres. Esta situação agrava-se quando é necessário proteger as fundações contra o choque de embarcações. Neste caso, as pernas podem-se convergir abaixo do tabuleiro, originando os formatos em  $\Delta$  e em diamante, com fundações de menor dimensão [15]. Na Figura 2.27 [3] pode observar-se um exemplo de uma ponte com torres em formato de diamante, a ponte Arthur Ravenel, nos EUA, uma das maiores pontes de tirantes do mundo.



Figura 2.27 - Ponte Arthur Ravenel, Carolina do Sul, EUA, com torre em forma de diamante

### 2.5 Tabuleiros

#### 2.5.1 Aspetos gerais

Os tabuleiros são constituídos, em regra, pela laje da plataforma, as vigas principais e as carlingas. São classificados de acordo com o material, podem ser de betão armado pré-esforçado, aço ou mistos aço-betão. O tipo de material do tabuleiro é um fator importante pois influencia, de forma significativa, o dimensionamento dos outros elementos estruturais e o custo da obra.

#### 2.5.2 Tabuleiros de aço

Com tabuleiros em aço é possível ter tabuleiros mais leves, quando comparados com os tabuleiros de betão. Contudo, o uso do aço nos tabuleiros pode torná-los mais caros.

As primeiras pontes de tirantes modernas (Figura 2.28) [3] tinham um número reduzido de tirantes, pelo que, as distâncias entre eles eram geralmente grandes. Assim, utilizaram-se tabuleiros de aço ou mistos aço-betão, por serem mais leves e mais resistentes.



Figura 2.28 - Ponte Knie, 1957, exemplo de ponte com o tabuleiro de aço

### 2.5.3 Tabuleiros de betão armado e pré-esforçado

Nas últimas décadas o betão tem sido utilizado com maior frequência nos tabuleiros das pontes de tirantes, principalmente com o uso de pré-esforço. Os tabuleiros de betão armado pré-esforçado podem conduzir a um menor custo da obra, sem comprometer aspetos relacionados com a rigidez. Segundo Walther *et al.* (1999) [8], uma das primeiras pontes de tirantes de betão armado foi a ponte Maracaibo, na Venezuela, em 1962 (Figura 2.29) [3]. Esta ponte foi estudada em modelo reduzido de "perspex", no LNEC.



Figura 2.29 - Ponte Maracaibo, Venezuela, 1962, um dos primeiros exemplos de ponte de tirantes com tabuleiro de betão armado

### 2.5.4 Tabuleiros de estrutura mista

As pontes de tirantes com tabuleiro misto aço-betão datam da década de 70 do século passado. De acordo com Walther *et al.* (1999) [8], as pontes com tabuleiro misto apresentam vantagens consideráveis. Uma das vantagens está associada à utilização da laje da plataforma de betão

armado e os demais elementos (vigas) de aço. Com este tipo de tabuleiro é possível reduzir o peso próprio, além de facilitar o processo construtivo [8]. Um exemplo de uma ponte de tirantes com um tabuleiro misto é a ponte sobre o rio Hoogly, na Índia (Figura 2.30) [3].



Figura 2.30 - Ponte sobre o rio Hoogly, Calcutta 1992, com tabuleiro misto aço-betão

### 2.5.5 Secções transversais dos tabuleiros

As secções transversais dos tabuleiros dependem do tipo de suspensão. Segundo Walther *et al.* (1999) [8], os momentos fletores longitudinais aumentam à medida que o tabuleiro se torna mais rígido. Assim, deve ajustar-se a sua rigidez, tornando-o o mais flexível possível. A rigidez ideal depende do espaçamento dos tirantes, do método de suspensão e da largura do tabuleiro [8].

O número de planos de suspensão é uma das principais características que pode afetar a escolha da secção transversal do tabuleiro. Usualmente, um plano de tirantes corresponde a uma suspensão central e dois à suspensão lateral. Assim, podem estabelecer-se tipos de secções transversais do tabuleiro, de acordo com o tipo de suspensão.

Segundo Walther [8], quando o tabuleiro tem suspensão central, necessita de elevada resistência à torção, pelo que a secção ideal é do tipo caixão [8]. As secções tipo mais utilizadas são representadas na Figura 2.31 [6]: a) caixão central estreito com almas verticais e escoras de apoio das consolas e vigas transversais; b) caixão trapezoidal com almas inclinadas e vigas transversais de suporte das consolas; c) caixão tricelular, composto por módulo central rígido com almas verticais e dois módulos laterais trapezoidais com almas inclinadas de suporte aos consoles; d) escoras inclinadas no interior do caixão de betão armado; e e) tabuleiro totalmente de aço, compondo por um trapézio exterior com forma aerodinâmica [6].

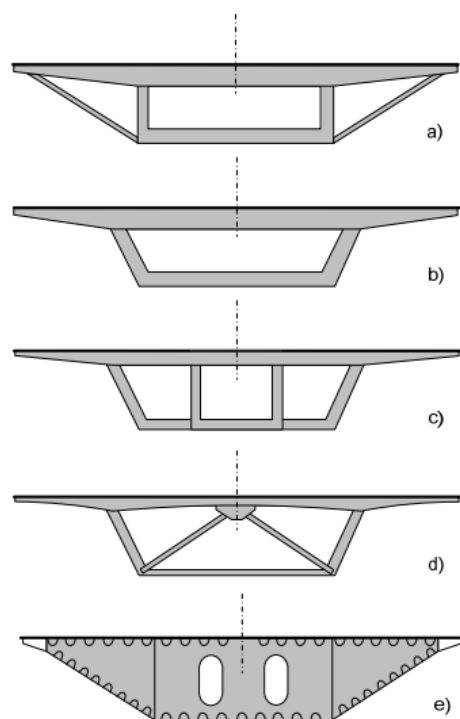


Figura 2.31 - Secções transversais dos tabuleiros com suspensão central

Quando o tabuleiro tem suspensão lateral, pode ser esbelto, podendo ser usado um sistema estrutural do tipo bi-viga ou em laje. Nas pontes com maiores vãos devem usar-se secções com alguma rigidez à torção. As tipologias mais comuns para estes tabuleiros são representadas na Figura 2.32 [6]: a) laje esbelta de betão, sendo a transmissão das cargas para os tirantes feita através da rigidez transversal da laje; b) caixão central, com transmissão das cargas para os tirantes através de duas diagonais fortemente tracionadas, que unem as extremidades inferiores das almas do caixão aos pontos de ancoragem dos tirantes; c) dois caixões laterais, próximos dos pontos de ancoragem dos tirantes, que requerem vigas transversais (carlingas) com boa rigidez e resistência, para transmitir as cargas das almas do caixão para os pontos de ancoragem dos tirantes; d) dois caixões laterais, centrados nos pontos de ancoragem e vigas transversais (esta solução necessita de diafragmas no interior dos caixões nas zonas de ancoragem, sendo uma boa solução quando se pretende inserir no tabuleiro passeios largos ou ciclovias); e) dois caixões triangulares ligados por vigas transversais nas secções de inserção dos tirantes, o que resulta numa secção mais aerodinâmica; e f) secção muito aerodinâmica, usualmente adotada nas pontes de tirantes de grande vão [6].

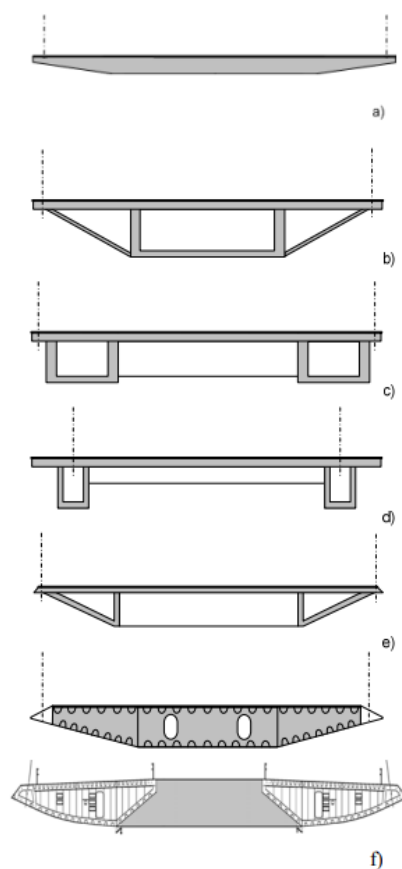


Figura 2.32 - Secções transversais dos tabuleiros com suspensão lateral

## 2.6 Pontes de tirantes no estrangeiro e em Portugal

### 2.6.1 Evolução das pontes de tirantes no estrangeiro

O primeiro desenho conhecido de uma ponte cujo tabuleiro era suportado por um conjunto de tirantes, para vencer maiores vãos, foi realizado por Fausto Veranzio, em Veneza (Itália). O modelo foi publicado no seu livro *Machinae Novae*, em 1617 [17]. A ponte consistia num tabuleiro com vigas de madeira suspenso por barras inclinadas e por cabos (Figura 2.33) [17].

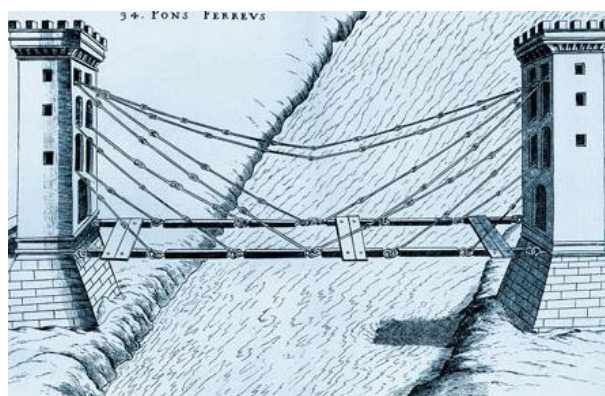


Figura 2.33 - Desenho de uma ponte atirantada por Fausto Veranzio, no seu livro *Machinae Novae*

Em 1784, Immanuel Löschner desenvolveu, na Alemanha, um modelo de ponte no qual considerava apenas tirantes inclinados para suportar o tabuleiro. A ponte tinha 44,3 m de comprimento e foi construída em madeira (Figura 2.34) [17].

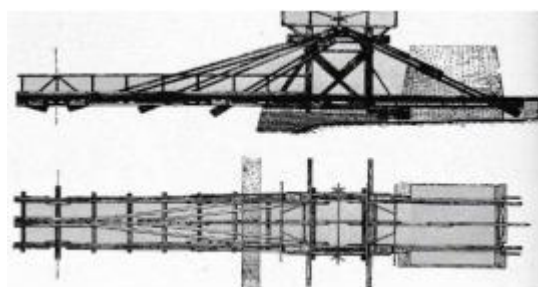


Figura 2.34 - Projeto de uma ponte atirantada, da autoria de Immanuel Löschner

Estas duas pontes tinham um projeto estrutural completo, porém nenhuma delas foi totalmente construída com o projeto original.

A primeira ponte atirantada, construída em 1817, foi projetada por dois ferreiros escoceses, James Redpath e John Brown. A ponte, designada por Kings Meadow, foi construída como uma passarela de pedestres sobre o rio Tamisa [1]. Porém, essa ponte não tinha um dimensionamento adequado e ruiu poucos anos depois. Também em 1817, John e William Smith construíram uma ponte sobre o rio Tweed na Escócia, utilizando um modelo similar à ponte Kings Meadow, que também colapsou devido à falta de conhecimento na época, bem como ao uso inadequado dos materiais de construção [1]. A Figura 2.35 [17]. representa a primeira ponte atirantada constuída.



Figura 2.35 - Primeira ponte atirantada construída: Kings Meadow, 1817 (Stephenson, 1821 apud Svensson, 2012)

Refere-se que o projeto e construção das pontes de tirantes ocorreu em paralelo com o das pontes suspensas, pois ambas levantavam problemas estruturais do mesmo tipo.

Na segunda metade do século XIX foram construídas algumas pontes suspensas com uma solução híbrida (parte suspensa e parte atirantada), em que se recorreu a tirantes inclinados para diminuir a deformabilidade do conjunto. A ponte de Brooklyn em Nova Iorque, projetada por J.A. Roebling e construída em 1883, é um exemplo deste tipo de solução (Figura 2.36) [3].



Figura 2.36 - Ponte de Brooklyn em Nova Iorque, 1883, com tabuleiro híbrido (suspensão e atirantado)

A primeira ponte de tirantes da era moderna, a ponte Stroomsund (Figura 2.37 e Figura 2.38) [3,17], foi construída por volta de 1955 pelo engenheiro alemão Franz Dischinger, na Suécia. Esta ponte tem três vãos, perfazendo um comprimento total de 332 m, tendo o vão central 182 m. O tabuleiro é constituído por betão e aço, suportado por tirantes de aço de alta resistência. Os tirantes de aço foram sujeitos a pré-esforços iniciais, para aumentar a sua rigidez efetiva, melhorando assim o seu desempenho [18].



Figura 2.37 - Primeira ponte atirantada moderna: Strömsund, 1956

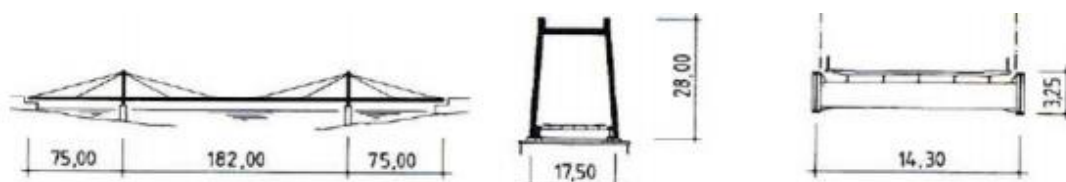


Figura 2.38 - Primeira ponte atirantada moderna: Strömsund, 1956

Além da ponte Strömsund, a ponte Donzère-Mondragon, construída sobre o canal de Donzère em França, também é considerada, por alguns autores, uma das primeiras pontes de tirantes modernas. A construção desta ponte mista, de betão e aço, foi concluída por volta de 1952, tendo o vão principal cerca de 81 m de comprimento [18]. Apresenta-se esta ponte na Figura 2.39 [3].



Figura 2.39 - Ponte Donzère-Mondragon em França, 1952

O desenvolvimento de pontes de tirantes ganhou maior expressão após a Segunda Guerra mundial, devido à necessidade da reconstrução, de forma rápida, das pontes que foram destruídas. Com o progresso dos métodos de análise estrutural, associado às experiências

malsucedidas do passado e à necessidade da construção de pontes com qualidade estética, as pontes de tirantes ganharam espaço na Europa, principalmente na Alemanha [1,18].

É importante citar um dos maiores investigadores da época, Fritz Leonhardt [10], que contribuiu de forma significativa para o avanço na área, designadamente nas questões da aerodinâmica.

Durante a década de 70 e 80 do século passado os vãos das pontes de tirantes não passaram de 500 m. Quando havia necessidade de vencer vãos maiores, eram utilizadas pontes suspensas. Porém, na década de 1990 as pontes atirantadas começaram a vencer vãos sucessivamente maiores (Gráfico 1) [19].

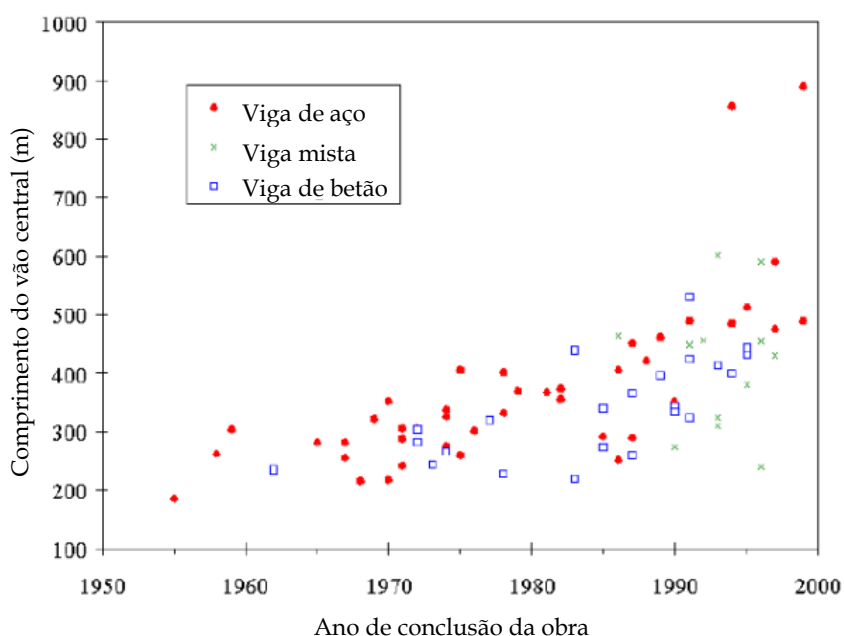


Gráfico 1- Evolução da extensão dos vãos das pontes de tirantes desde 1955

No final do século XX houve uma grande evolução na construção de pontes de tirantes. Pela primeira vez foi projetado um vão com mais de 500 m. A ponte Skarnsund (Noruega, 1991) (Figura 2.40) [3] e a ponte Yangpu (China, 1993) foram as primeiras a vencer essa fronteira. No entanto, as maiores realizações foram feitas no final da década, com a ponte da Normandia em França (1995), com um vão principal de 856 m [9].



Figura 2.40 - Ponte Skarnsund - Noruega, 1991

O século XXI tem sido marcado por um grande desenvolvimento das pontes de tirantes, principalmente na China e na Rússia, como foi citado na secção 2.1. Destaca-se a construção da ponte sobre o rio Sutong Yangtz na China, em 2008 (Figura 2.41) [3], com um vão principal de 1088 m [9].



Figura 2.41 - Ponte Sutong Yangtze - China, 2008

Na Tabela 1 listam-se algumas pontes de tirantes que marcaram a segunda metade do século XX e o início do século XXI, com os seus respetivos nomes, locais e ano de construção, extensão do vão principal e comprimento total.

Tabela 1 - Pontes de tirantes com maiores vãos, construídas desde 1952

| PONTE                | LUGAR     | ANO DE CONCLUSÃO | TAM VÃO PRINCIPAL (m) | COMPRIMENTO TOTAL (m) |
|----------------------|-----------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| Donzère-Mondragon    | França    | 1952             | 81                    | 160                   |
| Theodor Heuss        | Alemanha  | 1953             | 260                   | 476                   |
| STROMSUND            | Suécia    | 1955             | 182                   | 332                   |
| Düsseldorf           | Alemanha  | 1957             | 260                   | 1271                  |
| Marcaibo             | Venezuela | 1962             | 235                   | 8700                  |
| Friedrich Ebert      | Alemanha  | 1967             | 280                   | 520                   |
| KNEE                 | alemanha  | 1969             | 319                   | 561, 15               |
| Brotonne             | França    | 1970             | 320                   | 1278                  |
| Madi-kuf             | Libia     | 1971             | 282                   | 447                   |
| Saint-Nazaire        | França    | 1974             | 404                   | 720                   |
| Oberkassel           | alemanha  | 1976             | 257,75                | 615                   |
| Barrios de Luna      | Espanha   | 1983             | 440                   | 643                   |
| Alex Frase           | Canadá    | 1986             | 465                   | 2.525                 |
| Ikuchi               | Japão     | 1991             | 490                   | 790                   |
| Skarnsundet          | Noruega   | 1991             | 530                   | 1010                  |
| Yangpu               | China     | 1993             | 602                   | 8354                  |
| Normandia            | França    | 1995             | 856                   | 2141                  |
| Sutong               | China     | 2008             | 1088                  | 8146                  |
| Russky               | Rússia    | 2012             | 1104                  | 1885,53               |
| Hutong Yangtze River | China     | 2020             | 1092                  | 2300                  |

As pontes de tirantes têm evoluído de forma a apresentarem soluções de complexidade crescente, conceção inovadora e estética singular (Figura 2.42 e Figura 2.43) [3].



Figura 2.42 - Ponte Octávio Frias de Oliveira - Brasil, 2008



Figura 2.43 - Ponte Margaret Hunt Hill - EUA, 2012

## 2.7 Pontes de tirantes em Portugal

A primeira ponte de tirantes em Portugal foi construída em 1982, na Figueira da Foz, projetada pelo Prof. Edgar Cardoso. A ponte de tirantes seguinte foi a ponte Internacional sobre o rio Guadiana, construída em 1991 por um consórcio luso-espanhol, que permitiu uma ligação entre Portugal e Espanha com quatro vias.

As principais pontes de tirantes portuguesas podem ser divididas de acordo como o tipo de suspensão do tabuleiro:

- Pontes com suspensão lateral:

Edgar Cardoso (Figueira da Foz), Internacional sobre o rio Guadiana (Faro), , Arade (Portimão), Vasco da Gama (Lisboa) , passarela no Tâmega (Chaves), Pirâmides (Aveiro), 2 passagens superiores no trecho Almada – Coina da A2

- Pontes com suspensão central:

Viaduto em Santa Apolónia (Lisboa), viaduto da Corujeira (Porto), viaduto do Comboio (Madeira), Ave (Santo Tirso), Lis (Leiria), Salgueiro Maia (Santarém), Ponte Rainha Santa Isabel (Coimbra), Viaduto do Corgo (Vila Real).

Na Tabela 2 são listadas algumas destas pontes de tirantes portuguesas, com os respetivos vãos principais, comprimento total, ano de conclusão e local de construção [4]. Refere-se ainda a cronologia da sua construção (Figura 2.44).

Tabela 2 - Principais pontes de tirantes em Portugal

| Lista de Pontes de Tirantes em Portugal |                 |                  |                       |                       |
|-----------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| PONTE                                   | LUGAR           | ANO DE CONCLUSÃO | TAM VÃO PRINCIPAL (m) | COMPRIMENTO TOTAL (m) |
| Edgar Cardoso                           | Figueira da Foz | 1982             | 225                   | 1421                  |
| Internacional do Guadiana               | Faro            | 1991             | 324                   | 666                   |
| Arade                                   | Portimão        | 1991             | 256                   | 842                   |
| Vasco da Gama                           | Lisboa          | 1998             | 420                   | 12300                 |
| Salgueiro Maia                          | Santarém        | 2000             | 570                   | 4300                  |
| Rainha Santa Isabel                     | Coimbra         | 2004             | 186,5                 | 329,4                 |
| Viaduto do Corgo                        | Vila Real       | 2013             | 300                   | 2796                  |

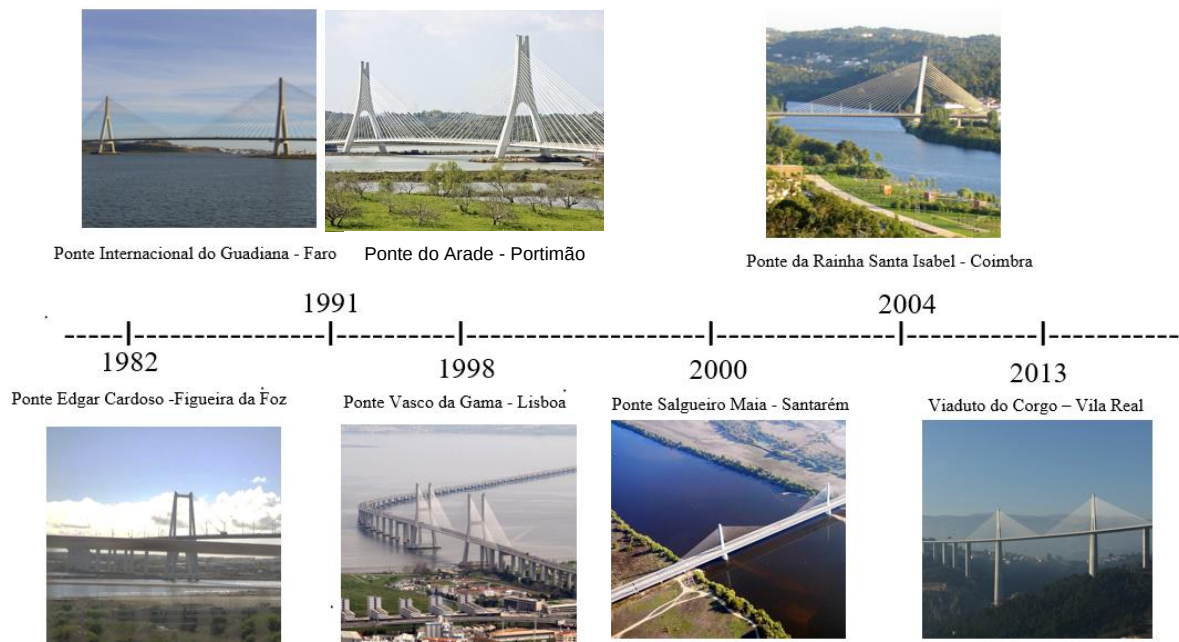


Figura 2.44 - Cronologia de construção de algumas pontes de tirantes em Portugal

Em capítulo próprio serão descritas a ponte Edgar Cardoso, na Figueira da Foz, e a ponte Internacional do Guadiana, em Castro Marim, que constituem os casos de estudo apresentados na presente dissertação

## OBSERVAÇÃO E ANOMALIAS DE TIRANTES DE PONTES

### 3.1 Considerações iniciais

A conservação e a reabilitação das construções são aspetos de extrema relevância, uma vez que se reconhece a importância cultural e económica de prolongar a vida útil das obras, em geral, e das pontes, em particular.

A observação, entendida como o conjunto de atividades envolvendo a monitorização, a inspeção e os ensaios, desempenha um papel muito importante na deteção e no acompanhamento dos processos de deterioração das obras.

O objetivo principal da observação das pontes de tirantes é a deteção atempada de possíveis anomalias que podem surgir nas estruturas, em geral, e nos tirantes, em particular. Deste modo é possível prevenir futuros problemas estruturais que poderiam vir a acontecer, garantir a exploração da ponte com os necessários níveis de segurança e evitar o agravamento das anomalias. A observação deve ser feita de maneira contínua, ao longo dos anos, de modo a acompanhar o desempenho das estruturas.

A monitorização é realizada através de uma instrumentação criteriosa das obras. Os resultados da monitorização permitem [19]:

- Controlar o desempenho da estrutura quando solicitada pelas diversas cargas atuantes;
- Analisar e interpretar os dados obtidos e compará-los com previsões iniciais ou ajustadas no tempo, para verificar se o comportamento é semelhante ao esperado;
- Identificar a existência de anomalias, danos ou qualquer alteração do estado da estrutura;
- Analisar a possível afetação do desempenho estrutural e verificar o comprometimento e a integridade da estrutura, caso haja anomalias;
- Detetar as anomalias em fase precoce do seu desenvolvimento e permitir uma rápida atuação para solucionar os problemas identificados;
- Aferir os resultados obtidos com as previsões dos modelos numéricos, com o objetivo de acompanhar o comportamento estrutural e a eventual melhoria dos sistemas de monitorização.

O sistema de monitorização é constituído por sensores, equipamentos de aquisição de dados e software de arquivo, tratamento e análise dos resultados da monitorização (Figura 3.1) [19].



Figura 3.1 - Componentes de um sistema de monitorização estrutural

Os sensores são instalados em secções e pontos estratégicos, para medição de grandezas relacionadas com as ações e os seus efeitos. A aquisição dos dados da monitorização é efetuada, atualmente, de forma automática com o recurso a *data loggers*, que se encontram ligados por meio de uma rede interna a uma unidade de controlo. Esta unidade de controlo permanece ligada a um computador que permite fazer o pré-tratamento e a gestão dos dados obtidos. O armazenamento e a disponibilização destes dados são efetuados num servidor através de uma página *Web*. As medições dos diferentes sensores encontram-se disponíveis em formato numérico e sob a forma de gráficos [20].

A monitorização pode ser estática ou dinâmica. No passado, as medições dos sensores eram obtidas através da realização manual de leituras em cada sensor instalado. Com o avanço tecnológico na área de monitorização das estruturas, desenvolveram-se sistemas automatizados capazes de facilitar o processo de obtenção de dados, minimizar os possíveis erros nas leituras, aumentar a frequência de aquisição, diminuir os custos operacionais, possibilitar a obtenção de um maior número de dados, fazer as leituras de forma remota e, por fim, realizar o controlo da segurança através da programação do envio de alertas, por exemplo, via email, em caso de deteção de uma anomalia.

As inspeções visuais, realizadas por técnicos com experiência comprovada, permitem a deteção e o acompanhamento da evolução de anomalias estruturais. Têm a vantagem de cobrir todas as zonas aparentes das estruturas.

A análise estrutural, em geral feita através de modelos de elementos finitos, permite a comparação entre as previsões e a observação, apoiando de forma decisiva o controlo da segurança e as intervenções nas obras.

## **3.2 Monitorização estrutural**

A fase mais importante do projeto de monitorização é a avaliação das grandezas a medir, em secções e pontos significativos do comportamento estrutural da ponte. O apoio da modelação é fundamental na escolha dos melhores locais para instalação da instrumentação, designadamente no que respeita aos maiores deslocamentos, momentos fletores e fragilidade estrutural. É também necessário escolher corretamente o tipo e a durabilidade dos sensores a utilizar, onde e como serão instalados, como serão processados e armazenados os dados e ainda efetuar o controlo e calibração do sistema, de forma a garantir a fiabilidade dos dados obtidos. Por fim, é necessário proceder à definição dos critérios de atuação face às informações obtidas com a monitorização.

Em regra, são monitorizadas as grandezas ao longo do tempo, relacionadas com as ações e os seus efeitos, como a temperatura do ar, a velocidade e o rumo do vento, as temperaturas dos elementos estruturais, as extensões e os deslocamentos horizontais, verticais e angulares, entre outras.

Os sensores são constituídos por transdutores, que transformam uma grandeza física (força, pressão, velocidade, etc.) num sinal elétrico, que é de seguida registado.

No mercado existe uma gama diversificada de sensores que podem ser utilizados nos sistemas de monitorização. Cabe ao engenheiro decidir quais a utilizar, tendo em consideração o tipo de grandeza a ser medida, os aspetos económicos e a qualidade e a durabilidade dos equipamentos [19].

### **3.2.1 Monitorização estática e dinâmica**

A monitorização estática das estruturas pode ser dividida em estrutural e geotécnica. Tendo em vista os objetivos do presente trabalho, será somente apresentada a vertente estrutural.

A monitorização estática estrutural destina-se à quantificação de modificações nas obras que podem afetar o desempenho ou colocar em risco a segurança, para se evitar a degradação progressiva e mesmo situações de colapso estrutural.

A monitorização dinâmica destina-se à quantificação das vibrações nas estruturas, sendo concretizada pela medição de acelerações, velocidades e deslocamentos. A excitação

pode ser natural ou induzida. São escolhidos e analisados pontos de monitorização específicos, representativos do comportamento estrutural.

Obtêm-se parâmetros como as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento. Com estes parâmetros é possível estimar a rigidez estrutural, utilizando modelação estrutural e este modelo estrutural permite comparar os resultados numéricos com os resultados obtidos experimentalmente. Caso os valores difiram, efetua-se a calibração do modelo e, por fim, realizam-se simulações para avaliar eventuais anomalias.

### 3.2.2 Medição de rotações

Os clinómetros (Figura 3.2 e Figura 3.3) [19] são dispositivos que permitem medir a inclinação ou a rotação da estrutura [19]. Os sensores mais comuns são constituídos por um pêndulo servo controlado que assegura o nível inicial do dispositivo e permite monitorizar alterações ao seu estado inicial.



Figura 3.2 - Exemplo de um clinómetro portátil



Figura 3.3 - Exemplo de um clinómetro fixo

### 3.2.3 Medição de extensões

Os extensómetros permitem medir as deformações que ocorrem devido às ações. Conhecidas as deformações e as propriedades reológicas dos materiais, é possível calcular as tensões. No caso de comportamento elástico linear, a tensão é dada pela lei de *Hooke*:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (3.1)$$

onde  $\sigma$  representa a tensão,  $\varepsilon$  a deformação medida nos extensómetros e  $E$  o módulo de elasticidade do material.

No mercado existem três tipos mais utilizados, os extensómetros de resistência elétrica, os de corda vibrante e os de fibra ótica.

Os extensómetros de resistência elétrica são muito utilizados devido ao seu baixo custo e reduzidas dimensões. Nas Figura 3.4, Figura 3.5 e Figura 3.6 [20] apresentam-se, respetivamente, exemplos de extensómetros de resistência elétrica (formado por uma grelha de um condutor com secção reduzida numa base flexível), de corda vibrante e de fibra ótica.

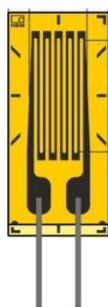


Figura 3.4 - Exemplo de um extensómetro de resistência elétrica

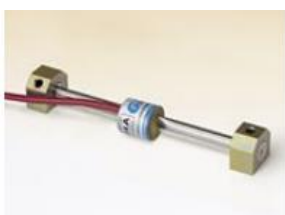


Figura 3.5 - Exemplo de um extensómetro de corda vibrante externo



Figura 3.6 - Exemplo de um extensómetro de fibra ótica

### 3.2.4 Medição de temperatura

Os sensores de temperatura destinam-se a medir as variações térmicas. Contribuem ainda para a correção das medições feitas por outros sensores que tenham sofrido alteração pelos efeitos da variação da temperatura. Os mais utilizados são os termopares, os de resistência elétrica (RTD) e os de fibra ótica (Figura 3.7 a Figura 3.9) [19].



Figura 3.7 - Exemplo de sensor de temperatura do tipo termopar



Figura 3.8 - Exemplo de sensor de temperatura de resistência elétrica



Figura 3.9 - Exemplo de sensor de temperatura de fibra ótica

### 3.2.5 Medição de humidade relativa do ar

Os sensores de humidade destinam-se à medição do teor de humidade no local a ser monitorizado. São úteis no estudo de anomalias das pontes relacionadas com a existência de infiltrações ou acumulação de água, com a consequente absorção de humidade pelos elementos monitorizados. São também utilizados para garantir o funcionamento adequado de outros sensores instalados nas proximidades, uma vez que um dos fatores que contribuem para o mau funcionamento dos sensores é a presença de água. A elevada humidade associada pode causar leituras erradas ou danificar os dispositivos metálicos dos sensores, causando corrosão. A Figura 3.10 [20] apresenta um tipo de sensor de humidade juntamente com o sensor de temperatura, utilizados nos sistemas de monitorização de pontes. Também estão disponíveis no mercado sensores de humidade do tipo capacitivo, resistivo, termocondutor, de fibra ótica e soluções utilizando a tecnologia MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) [19].

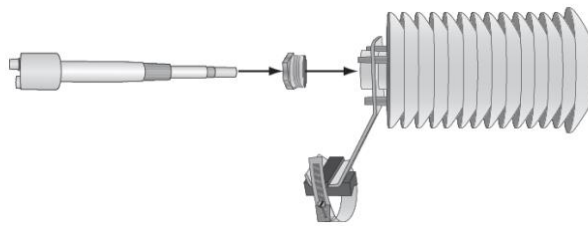


Figura 3.10 - Exemplo de um sensor de platina para a medição da temperatura e da humidade relativa do ar

### 3.2.6 Medição da velocidade e da direção do vento

Os sensores de medição do vento, também conhecidos como anemómetros, são usualmente instalados ao nível do tabuleiro, próximo das secções de meio vão, e medem a direção e a velocidade do vento. A informação destes sensores permite a verificação da interferência do vento no comportamento estrutural através das pressões e das sucções sobre os elementos estruturais. Os anemómetros mais utilizados no sistema de monitorização são os de hélice, de copos e os ultrassónicos (Figura 3.11 à Figura 3.13) [19].



Figura 3.11 - Exemplo de um anemômetro em hélice para a medição do rumo e da velocidade horizontal do vento



Figura 3.12 - Exemplo de um anemômetro de copos



Figura 3.13 - Exemplo de um anemômetro ultrassônico

### 3.2.7 Medição da largura das juntas de dilatação

Utilizam-se transdutores de deslocamentos para a medição das variações da abertura de juntas de dilatação existentes nos tabuleiros das pontes. Na Figura 3.14 [20] apresenta-se um exemplo deste tipo de dispositivos.



Figura 3.14 - Exemplo de dispositivo para a medição das variações da abertura das juntas de dilatação

### 3.2.8 Medição das acelerações

Os acelerômetros são sensores importantes neste sistema pois medem as acelerações produzidas nas estruturas, devidas à excitação natural (ambiente) ou artificial (excitadores mecânicos e eletrônicos).

Existem três modelos de acelerômetros no mercado: piezoelétricos, piezoresistivos ou capacitivos e de tipo “force balance” (Figura 3.15 à Figura 3.17) [21].



Figura 3.15 - Exemplo de um acelerómetro piezoelétrico



Figura 3.16 - Exemplo de um acelerómetro capacitivo

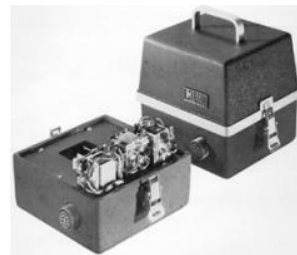


Figura 3.17 - Exemplo de um acelerómetro tipo force balance

### 3.2.9 Medição da força nos tirantes

Existem diversas possibilidades para avaliar as forças instaladas nos tirantes. Neste documento destacam-se três processos pelo facto de serem os mais utilizados. O primeiro processo baseia-se na utilização de um macaco hidráulico para efetuar o puxe dos cordões, e no registo dos diagramas de alongamento do êmbolo do macaco em função da força necessária para provocar esse alongamento. O segundo processo corresponde à medição da frequência de vibração dos tirantes, uma vez que o seu quadrado é proporcional à força neles instalada. E por fim, o terceiro processo consiste na utilização de células de força abrangendo os cordões individualmente.

#### 3.2.9.1 Avaliação da força por puxe dos cordões

Para a avaliação de força por puxe dos cordões utiliza-se um macaco hidráulico. Em obra, é usual considerar-se que a força que está instalada no cordão é igual a força que é necessário aplicar com o macaco, para que as cunhas se soltem.

#### 3.2.9.2 Avaliação da força a partir da frequência de vibração dos tirantes

A determinação das forças instaladas em cabos e tirantes pode ser feita a partir de ensaios de vibração ambiental e baseia-se na teoria das cordas vibrantes.

A teoria das cordas vibrantes baseia-se no estudo da propagação de ondas numa corda horizontal tracionada, fixa em ambas as extremidades, de secção transversal desprezível e com massa uniformemente distribuída  $m$ . Esta teoria permite relacionar as frequências naturais de vibração  $f_i$  dos modos  $i$  com a força  $N$  instalada numa corda. A equação da teoria das cordas vibrantes é dada por [22]:

$$f_i = \frac{i}{2L} \sqrt{\frac{N}{m}} \quad (3.2)$$

onde,

$f_i$  é a frequência natural de vibração do modo  $i$  (Hz)

$L$  o comprimento da corda (m)

$N$  a força instalada na corda (N)

$m$  a massa por unidade de comprimento (kg/m)

Ao aplicar a teoria das cordas vibrantes em cabos nas pontes de tirantes, deve ser feito algumas correções de forma a contornar os erros na determinação da força instalada. Estes erros podem estar associados, por exemplo, aos efeitos da rigidez de flexão da secção transversal e/ou da curvatura dos cabos devido ao peso próprio [22].

Neste ponto refere-se à formulação obtida por Mehrabi e Tabatabai [23] que considera os efeitos associados à rigidez de flexão da secção transversal dos cabos e os efeitos causados pela sua curvatura [22].

O efeito da rigidez de flexão é significativo nos tirantes com comprimento relativamente curto, e o fator corretivo associado depende essencialmente do parâmetro normalizador de rigidez de flexão  $\zeta$ , dado por [24]:

$$\zeta = \sqrt{\frac{NL^2}{EI}} \quad (3.3)$$

onde  $EI$  é a rigidez de flexão da secção transversal do cabo.

Ao contrário do que acontece com a rigidez de flexão, cujos efeitos aumentam com a ordem do modo, a curvatura dos cabos afeta essencialmente o primeiro modo de vibração [23]. Os efeitos da curvatura do cabo são tidos em conta na formulação corretiva de Mehrabi e Tabatabai através do parâmetro de Irvine  $\lambda^2$  [23]. Valores de  $\lambda^2$  compreendidos entre 0 e 1, refletem cabos altamente tensionados com flechas ou curvaturas reduzidas e esta situação é típica dos tirantes de pontes atirantadas. O parâmetro de Irvine, incorpora tanto as características geométricas do cabo como as suas características de deformabilidade, sendo definido por [22]:

$$\lambda^2 = \left(\frac{mgL}{N}\right)^2 \frac{L}{NL_e/EA} \quad (3.4)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $EA$  representa a rigidez axial do cabo e  $L_e$  é o comprimento virtual do cabo dado por:

$$L_e \approx L \left[ 1 + 8 \left( \frac{d}{L} \right)^2 \right] \quad (3.5)$$

onde  $d$  é a flecha na vertical medida a meio vão definida como:

$$d = \frac{mgL^2}{8N} \quad (3.6)$$

A formulação corretiva da teoria das cordas vibrantes deduzida por Mehrabi e Tabatabai [23] é escrita em função de  $\zeta$  e  $\lambda^2$ , é dada por:

$$f_i = \frac{i}{2L} \sqrt{\frac{N}{m}} \left( \alpha \beta_i - 0,2A \frac{\mu}{\zeta} \right) \quad (3.7)$$

onde,

$$\alpha = 1 + 0,039\mu \quad (3.8)$$

$$\beta_i = 1 + \frac{2}{\zeta} + \left( 4 + \frac{i\mu^2}{2} \right) \frac{1}{\zeta^2} \quad (3.9)$$

Para modos no plano vertical do cabo tem-se:

$$\mu = \begin{cases} \lambda^2 & \text{se } i = 1 \\ 0 & \text{se } i > 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

Para modos fora do plano vertical  $\mu = 0$

Desta forma, para modos que não o primeiro modo de vibração, a formulação considera apenas os efeitos da rigidez de flexão [22].

Para determinar a força instalada nos cabos, deve-se identificar as frequências naturais dos tirantes através das leituras realizadas com os acelerômetros (Figura 3.18) [22] instalados nos tirantes, aplicar a teoria das cordas vibrantes e seus respectivos ajustes.



Figura 3.18 - Fixação através de uma chapa metálica e braçadeiras

### 3.2.9.3 Avaliação da força com células de força

É possível efetuar a avaliação da força instalada num tirante com recurso a células de força, que normalmente só abrangem um cordão.

No caso da Ponte Internacional sobre o Rio Guadiana, o sistema utilizado para medição da força nos tirantes baseia-se na medição da força em dois cordões por cabo. Nesta ponte o tensionamento dos cordões foi efetuado recorrendo ao sistema de equitensão ConTen da DIWIDAG, que permite que todos os cordões tenham forças idênticas. Deste modo, a força no tirante pode ser estimada a partir do valor das forças individuais medidas nos cordões.

As células de força instaladas, nesta ponte, correspondem aos sensores DYNA Force, da DIWIDAG. Estes sensores baseiam-se nas alterações das propriedades elasto-magnéticas dos materiais ferromagnéticos, dado que a permeabilidade magnética do aço varia em função da tensão a que se encontra sujeito o aço.

### 3.2.10 Unidades de controlo, aquisição e transmissão de dados

A informação que é recolhida pelos sensores é adquirida e transmitida para um computador, que depois a armazena. Os sinais podem ser transmitidos por meio de cabos de comunicação ou sistemas sem fio (*wireless*). São necessárias fontes de alimentação fiáveis para que o sistema funcione sem interrupções. Existem diversos sistemas de aquisição, com variadas funções [25]. A Figura 3.19 [26] apresenta um esquema com as diferentes fases deste sistema, de acordo com o livro "*Instrumentation for engineering measurements*".

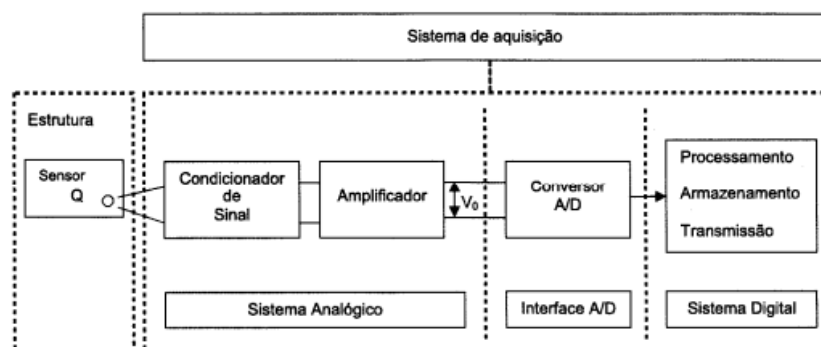


Figura 3.19 - Esquema de aquisição da informação num sistema de monitorização

Os sistemas de aquisição podem ser constituídos por placas de aquisição integradas em computadores, ou serem equipamentos de funcionamento autónomo, dispensando ligação permanente a computadores. O primeiro sistema pode ser mais económico e potente, porém apresenta uma desvantagem, pois necessita de cabos de ligação com grandes comprimentos para conectar aos sensores, além de necessitar de um computador em obra. O segundo sistema é menos potente e mais caro pois interliga um número inferior de sensores. Porém, se for adotada uma ligação em rede, pode permitir uma redução do comprimento dos cabos e as perdas associadas, e possibilitar a instalação de caixas ou armários de proteção. A Figura 3.20 e a Figura 3.21 apresentam dois exemplos de sistemas de aquisição autónomos, o primeiro da série DT515 e o segundo o CompactRio, desenvolvido pela National Instruments [25].



Figura 3.20 - Exemplo de um sistema de aquisição autónomo, da série DT515



Figura 3.21 - Exemplo de um sistema de aquisição autónomo, do tipo CompactRio

No sistema de aquisição integrado em computadores (Figura 3.22 à Figura 3.24) [21], todos os sensores são ligados a subsistemas de aquisição do tipo *data loggers* (Figura 3.25 e

Figura 3.26) [20], controlados por um computador industrial instalado em obra. Os dados adquiridos são por sua vez enviados para um servidor FTP (*file transfer protocol*) por meio de um *router* (Figura 3.27) [21], que permite o acesso remoto ao computador. A aquisição dos sinais dos transdutores deve ser efetuada com a frequência correta e pode ser realizada através de uma rotina desenvolvida com uma linguagem computacional. Esta rotina deve registrar os dados num intervalo de tempo definido mediante os objetivos da monitorização. No caso da monitorização dinâmica e com base no teorema de Nyquist, a taxa de conversão deve ser, pelo menos, duas vezes superior à componente máxima da frequência do sinal a medir, para não provocar distorções nos dados obtidos [25].

Os sistemas de aquisição e processamento de dados são definidos conforme as capacidades dos *data loggers*, as necessidades de leitura, a localização dos transdutores e a distância entre eles [20].



Figura 3.22 - Exemplo de caixa com computador e subsistemas de aquisição



Figura 3.23 - Exemplo de um computador utilizado para o sistema de aquisição (Advantech UNO-2484G)



Figura 3.24 - Exemplo de uma unidade de controlo do sistema de aquisição (Gantner)



Figura 3.25 - Exemplo de data logger (Gantner)



Figura 3.26 - Exemplo de Data logger (dataTaker)



Figura 3.27 - Exemplos de routers para ligação à Internet

## 3.3 Inspeções

### 3.3.1 Metodologias de inspeção

As inspeções periódicas são muito importantes para a manutenção adequada das obras, bem como para a garantia do seu funcionamento estrutural. Entende-se por inspeção o processo de verificação do estado de conservação e do estado de manutenção dos diversos elementos de uma estrutura.

Durante o processo de inspeção compete ao engenheiro e sua equipa verificar *in situ* todas as anomalias possíveis existentes em cada elemento da obra. Estas anomalias devem ser identificadas e estudadas para se compreender as respetivas causas. Além disso, pode ser necessário fazer medições, como por exemplo a verificação da largura de juntas de dilatação e de fendas e a medição de deslocamentos relativos em aparelhos de apoio. As inspeções podem ainda levar à execução de ensaios, de que são exemplo os de medição das forças em tirantes.

Previamente à inspeção deve ser feito um planeamento, com a organização dos elementos a serem inspecionados, de acordo com o objetivo da mesma. O material necessário para a inspeção deve incluir: lanternas para a utilização em locais pouco iluminados (ancoragens de cabos e de tirantes, interior de tabuleiros ou de pilares, etc.), câmara fotográfica para o registo

das anomalias, régua para medição da abertura de fendas, desenhos e esquemas das estruturas e caneta/lápis para realização de apontamentos. É importante numerar as fotografias, para auxiliar a organização do relatório da inspeção, apontando a localização das anomalias na obra [26].

Contudo, a inspeção visual pode não ser suficiente face às limitações apresentadas por cada obra, pelo que tal deve ser analisado antes da mobilização da equipa para a obra. Nas pontes, é comum haver locais críticos em termos de acesso, de que são exemplos a face inferior de tabuleiros situados sobre vales cavados e sobre leito de rios, a interface das vigas com os pilares, o topo dos pilares, a ancoragem dos tirantes no tabuleiro e zonas elevadas dos tirantes. Essas zonas requerem a utilização de equipamentos especiais, como plataformas móveis de inspeção, de barcos ou até mesmo técnicos fazendo *rappel* com o uso de cordas, equipamentos e treino adequados. Na Figura 3.28 [26] apresentam-se zonas inacessíveis ou de acesso difícil para inspeção, bem como os equipamentos e técnicas que permitem realizar as atividades de inspeção [26].

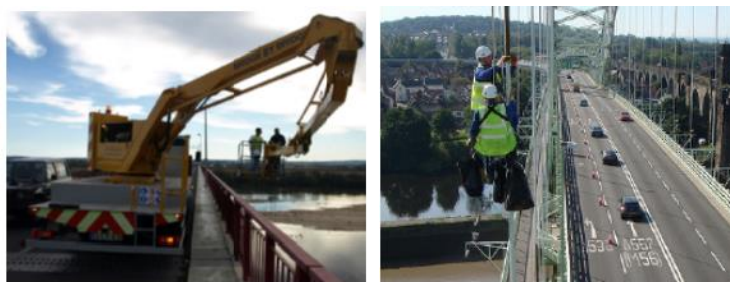


Figura 3.28 - Equipamentos e técnicas de realização de inspeções em zonas de difícil acesso

Com a evolução da tecnologia, nos dias atuais é possível utilizar *drones* ou robôs com vários sistemas de sensores para adquirir os dados das estruturas estudadas, armazená-los e transmiti-los em tempo real. Assim, existem diferentes veículos aéreos ou terrestre, controlados de forma remota por um operador ou que podem ser executados de maneira programada e autónoma.

Os *drones* (Figura 3.29) capturam imagens para uma inspeção visual detalhada da estrutura e podem gerar modelos 3D realistas para análises detalhadas. Este equipamento contribui de forma eficiente para a inspeção pois cobrem pontos cegos da inspeção visual, reduzem riscos de segurança dos técnicos de inspeções e pontes, fazem registo de dados e não causam impacto no tráfego [27].



Figura 3.29 - Drones utilizados em inspeções

Como exemplo de um sistema utilizado em inspeções de ponte tem-se o sistema robótico automático, desenvolvido pela Universidade Nevada, Reno nos Estados Unidos no qual todos os dados do tabuleiro da ponte são recolhidos e automaticamente processados de forma a gerar um relatório da condição estrutural em tempo real. Neste sistema um robô móvel, com quatro rodas, percorre o tabuleiro da ponte de forma autónoma a realizar a trajetória programada para a inspeção. São utilizadas a tecnologia *Câmara digital Single-lens Reflex (DSLR)*, o Georadar para avaliar as condições mais profundas da ponte como as vigas de aço e os sensores de resistividade elétrica para avaliar a resistência do betão do tabuleiro (Figura 3.30) [28].



Figura 3.30 - Exemplo de um robô utilizado para a realização de inspeções em pontes

Especificamente, em pontes de tirantes a inspeção visual dos elementos constituintes do sistema de tirantes é de extrema importância. É preciso avaliar o estado dos próprios cabos e das zonas de ancoragem, para verificar se existem microfissuras nos cabos, desgaste por corrosão, batimento dos cordões, fios soltos ou partidos, entre outras anomalias apresentadas adiante.

Contudo, nem sempre é possível detetar, de forma visual, todas as anomalias e os efeitos que podem gerar na estrutura, pelo que a monitorização desempenha um papel fundamental, complementarmente à inspeção. Para que se possam obter dados para decidir o momento adequado da substituição dos tirantes, deve ser mantido um registo de todas as inspeções periódicas realizadas. Nesse registo deverão constar os pontos de deterioração listados anteriormente e a evolução das anomalias apresentadas.

### 3.3.2 Relatórios das inspeções

Após realizada a inspeção, deve ser elaborado um relatório que apresente, de maneira detalhada, tudo o que foi observado na estrutura, todos as medições e ensaios realizados, as anomalias e respetivas causas. Deve ser também feita uma avaliação dos elementos inspecionados e os respetivos estados de conservação e de manutenção. Por fim, devem ser propostas intervenções, consoante o nível de importância e de premência.

Este relatório deve apresentar a data e as horas de inspeção, bem como os dados ambientais do período em que foi realizada, como temperatura, condições climáticas (chuva, sol, vento, neve, etc.), pois esses fatores podem influenciar de maneira significativa o comportamento da estrutura e podem auxiliar na compreensão da evolução das anomalias observadas.

O relatório deve também incluir a apresentação e a localização da obra a descrição das anomalias dos elementos que foram inspecionados (taludes, encontros, pilares, torres, aparelhos de apoio, tabuleiro, tirantes, cornijas, guarda-corpos, guardas de segurança, passeios, revestimento de via, drenagem, juntas de dilatação, sistema de iluminação, sistema de monitorização estrutural, sinalização e elementos acessórios).

Na inspeção pode aplicar-se o procedimento utilizado no Sistema de Gestão de Conservação de Obras de Arte da Infraestruturas de Portugal (SGOA-IP). A descrição das anomalias observadas e a avaliação dos estados de manutenção e de conservação da obra de arte são organizadas por componentes definidas no SGOA (Figura 3.31) [29].

|   | Componente         |    | Componente           |    | Componente          |
|---|--------------------|----|----------------------|----|---------------------|
| 1 | Obra de arte       | 6  | Apoios intermédios   | 11 | Passeios            |
| 2 | Muros*             | 7  | Tabuleiro            | 12 | Revestimento de via |
| 3 | Taludes            | 8  | Cornijas             | 13 | Drenagem            |
| 4 | Encontros          | 9  | Guarda-corpos        | 14 | Juntas de dilatação |
| 5 | Aparelhos de Apoio | 10 | Guardas de segurança | 15 | Outros Componentes  |

Figura 3.31 - Componentes de uma obra de arte considerados no SGOA

Como resultado da inspeção são definidos os estados de manutenção e de conservação da obra.

A classificação do estado de manutenção da obra, ou dos seus componentes, está associada aos danos menos relevantes, cuja correção poderá ser conseguida no âmbito de trabalhos de manutenção. O estado de manutenção da obra pode ser classificado como "bom" ou "mau", sendo que se o elemento for classificado como "bom", não é necessário realizar trabalhos de manutenção adicional.

A classificação do estado de conservação da obra, ou dos seus componentes, corresponde à avaliação de situações que, a curto ou médio prazo, possam ter consequências graves para a segurança estrutural da obra ou para a segurança do tráfego, ou ainda das quais resultem danos, cuja correção não atempada possa ter como consequência a necessidade de realizar trabalhos de reabilitação com custos elevados. A classificação do estado de conservação tem seis níveis, que variam entre 0 e 5, cujo significado e consequências foram atualizados em 2019 (Figura 3.32) [29].

| Índice | Estado de Conservação | Definição                                                                                                                                                                                                                                                                       | Seguimento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0      | Excelente             | Estado exemplar de conservação. Admitem-se anomalias insignificantes.                                                                                                                                                                                                           | Não é necessário efetuar reparações e os materiais utilizados, além de serem de excelente qualidade, não apresentam sinais de degradação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 1      | Bom                   | Estado normal de conservação. Existência de anomalias que ainda não afetam o comportamento, mas comprometem a durabilidade.                                                                                                                                                     | É dispensável efetuar qualquer trabalho de reparação.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 2      | Regular               | Estado de conservação satisfatório. Existência de anomalias com alguma importância na durabilidade ou na funcionalidade, mas com impacto insignificante no seu comportamento.                                                                                                   | São definidos trabalhos de reparação não prioritários, para realização a longo prazo (recomendável 6 a 10 anos). Podem ser recomendadas ações complementares de diagnóstico ou monitorização, para aferição da evolução no médio e longo prazo das anomalias detetadas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 3      | Irregular             | Estado de conservação deficitário. Existência de anomalias que reduzem significativamente a durabilidade ou condicionam o comportamento, ou cuja rápida evolução possa vir a afetar a segurança.                                                                                | São definidos trabalhos de reparação para realização no médio prazo (recomendável 2 a 6 anos). Se for expectável rápida evolução que comprometa o comportamento e a capacidade resistente da obra, deve ser especificada a realização de avaliação técnica. Caso não seja expectável evolução significativa da sua condição ou capacidade de serviço, a intervenção poderá ser reavaliada na próxima inspeção principal. A opção quanto à data de intervenção ou de reavaliação na próxima inspeção deverá ser expressamente indicada e devidamente justificada. Podem ser recomendadas ações complementares de diagnóstico ou monitorização, para aferição da evolução no curto e médio prazo das anomalias detetadas. |
| 4      | Deficiente            | Estado de conservação muito grave. Existência de anomalias que afetam de forma gravosa o comportamento, a capacidade resistente e a segurança estrutural, com importância na integridade. Não cumpre os requisitos mínimos para desempenhar a função para a qual foi concebido. | Deve ser especificado o início de intervenção a curto prazo (recomendável até 2 anos). Deve ser especificada a necessidade de um Projeto reforço/reabilitação. Pode ser restringida a sua exploração através de condicionamentos à circulação, ou desencadeadas outras intervenções de carácter preventivo tais como escoramentos ou reforços temporários. Devem ser recomendadas ações complementares de diagnóstico ou monitorização, para aferição da evolução no curto prazo das anomalias detetadas.                                                                                                                                                                                                               |
| 5      | Mau                   | Estado de ruína ou de falha iminente. Existência de anomalias que colocam em causa a integridade e segurança estrutural. A sua capacidade resistente está severamente afetada.                                                                                                  | Deve ser especificado o início de intervenção com urgência ou a muito curto prazo (recomendável até 1 ano). Deve ser especificada a necessidade de um Projeto reforço/reabilitação. Devem ser implementadas medidas restritivas da circulação, em termos de carga, velocidade ou modo de circulação ou outras intervenções de carácter preventivo que mitiguem o risco de exploração, tais como escoramentos ou reforços temporários.                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

Figura 3.32 - Estados de conservação definidos no SGOA

No relatório de inspeção devem ainda ser indicadas as medidas de intervenção e de reabilitação das anomalias encontradas.

### 3.4 Caracterização dos tipos de anomalias em tirantes de pontes

As pontes estão submetidas às diferentes ações, ao longo de sua vida útil, que condicionam o funcionamento estrutural. De acordo o Guia Técnico da EP, 2015, as ações originam tensões e deformações nas estruturas, e estas ações (Figura 3.33) [26] podem alterar as propriedades dos materiais, afetando a sua durabilidade.

| Classificação das ações nas estruturas e seus materiais |                  |           |                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------|------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ações sobre a estrutura (ou ações mecânicas)            | Ações estáticas  | Diretas   | Ações permanentes e sobrecargas (e.g. peso próprio, equipamentos, vegetação generalizada, etc.)                                                                                                   |
|                                                         |                  | Indiretas | Ações contínuas ou cíclicas (e.g. deformações impostas por assentamento do terreno, retração da argamassa, etc.)                                                                                  |
|                                                         | Ações dinâmicas  |           | Acelerações transmitidas à estrutura (e.g. sismos, vento, tráfego, etc.)                                                                                                                          |
| Ações sobre os materiais                                | Ações físicas    |           | Alteração das propriedades dos materiais por processos de deterioração, que decorrem de diferentes agentes ambientais (e.g. presença de água, variações de temperatura, humidade, poluição, etc.) |
|                                                         | Ações químicas   |           |                                                                                                                                                                                                   |
|                                                         | Ações biológicas |           |                                                                                                                                                                                                   |

Figura 3.33 - Classificação de ações nas estruturas e seus materiais (Fonte: Guia Técnico da EP, 2015)

É difícil prever, de forma uniforme e clara, as anomalias que podem surgir nas pontes, por efeito das ações reais a que estão submetidas. No que toca às pontes de tirantes, existem anomalias de diversos tipos e com diversas causas: químicas, mecânicas, deficiências construtivas ou utilização de soluções que não garantem a proteção adequada dos tirantes. A identificação das causas das anomalias é essencial para uma boa gestão da conservação das pontes.

As anomalias podem ser causadas pela falta de pormenorização dos projetos, má execução durante a construção, má qualidade dos materiais, modificação do tráfego com aumento das sobrecargas, acidentes (choque de veículos ou barcos, mudança da ondulação do mar), intempéries e sismos. Na Figura 3.34 [30] estão representadas algumas destas causas.

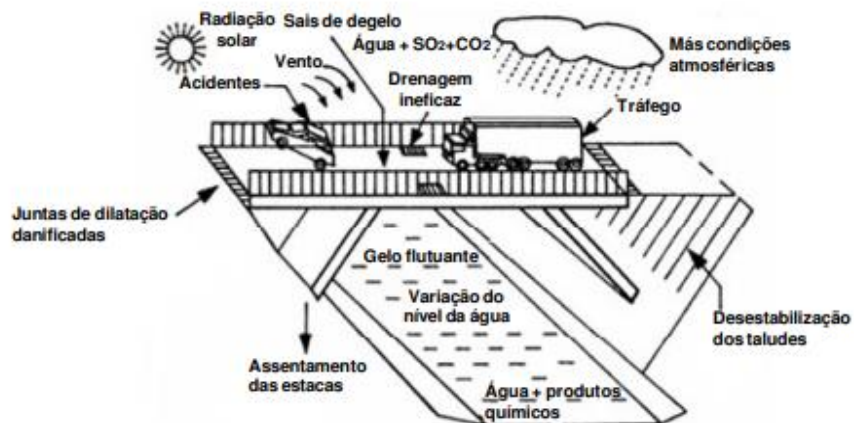


Figura 3.34 - Fatores que podem contribuir para a diminuição da vida útil das pontes

As anomalias podem surgir de forma individual ou combinada nas pontes. Muitas das anomalias manifestam-se nas zonas aparentes, o que facilita a sua deteção e avaliação, no que respeita à sua origem e natureza [30].

Para avaliar a ocorrência de deformações excessivas, deslocamentos não esperados e recalques na fundação deve ser analisado o funcionamento global da ponte. A análise de degradações locais envolve, em geral, as seguintes componentes: os tirantes, as ancoragens, as torres, os apoios intermédios, o tabuleiro, as cornijas, os guarda-corpos, os aparelhos de apoio, as juntas de dilatação, o sistema de drenagem, os passeios e os muros [30].

Devido ao número muito elevado de anomalias que podem surgir nas pontes atirantadas, esta dissertação focará as anomalias que podem surgir nos tirantes, designadamente cabos partidos ou soltos, redução do diâmetro dos cabos e perda da secção transversal, corrosão dos cabos, deformações dos cabos, descasque na camada de proteção dos cabos, tubos anti-vandalismo partidos, infiltrações e humidades nos sistemas de ancoragem, etc.

## 3.5 Anomalias de origem mecânica

### 3.5.1 Aspetos gerais

A principal anomalia apresentada pelos tirantes das pontes está relacionada com fios partidos ou soltos, que normalmente surgem por danos mecânicos, embora também possam surgir por corrosão. Na Figura 3.35 [31] e na Figura 3.36 [31] apresentam-se exemplos de fios partidos nas zonas de ancoragem de um tirante no tabuleiro e na Figura 3.37 [31] mostram-se os fios sem tensão.

As anomalias de origem mecânica que podem surgir nos tirantes de pontes podem estar relacionadas com o aumento das sobrecargas do tabuleiro, com a fadiga do material dos cabos ou pelo aumento da flexão dos cordões. Também podem estar associadas aos dispositivos que fazem parte do conjunto, como os amortecedores, os dispositivos de centragem, a falta ou o posicionamento indevido das braçadeiras, ocasionando batimentos dos cordões e o desgaste dos fios por abrasão [31].

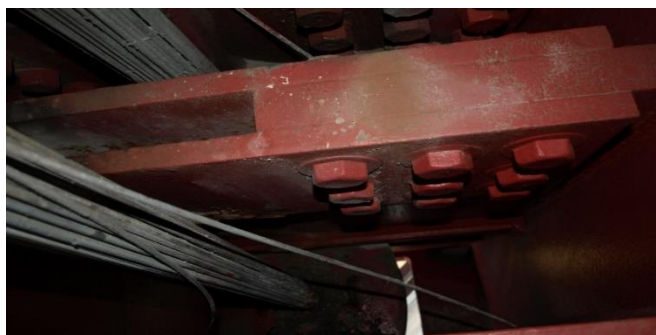


Figura 3.35 - Exemplo de fios partidos junto à ancoragem dos tirantes no tabuleiro - 1/2



Figura 3.36 - Exemplo de fios partidos junto à ancoragem dos tirantes no tabuleiro - 2/2



Figura 3.37 - Exemplo de fios sem tensão junto à ancoragem dos tirantes no tabuleiro

### 3.5.2 Excesso de tensão

O aumento do fluxo ou do peso dos veículos pode ultrapassar os valores previstos no projeto, o que pode gerar um aumento significativo das sobrecargas. Dawe *et al.* [32] referem um aumento crescente do tráfego rodoviário ao longo do tempo (quer em volume quer em

peso bruto). O aumento das sobrecargas implica um acréscimo, não esperado, das tensões de tração nos tirantes.

Das ações das sobrecargas, indutoras de efeitos dinâmicos sobre a ponte, destacam-se: a) as características dos veículos que transitam; b) o fluxo de tráfego; c) a rugosidade da estrada; e d) o comportamento dinâmico da própria ponte. Estas ações podem originar problemas de fadiga, pelo que é imperativo que seja tida em consideração aquando da avaliação do tempo de vida remanescente de uma ponte. Como exemplo, pode ser referido o estudo de Alves (2012), onde se reporta que "o aumento percentual de tráfego e a ausência de controlo das cargas máximas transportadas contribuem para a aceleração dos danos devido à fadiga em obras de artes especiais rodoviárias. Um desafio atual consiste em quantificar estes efeitos e o seu impacto potencial sobre a vida útil das estruturas viárias existentes" [33].

Há ainda a considerar os efeitos dinâmicos devidos do vento e dos sismos, que induzem vibrações nos tirantes, podendo introduzir um excesso de tensão nos mesmos.

### 3.5.3 Fadiga

Frequentemente, observa-se que as falhas em elementos de aço não ocorrem devido a carregamentos estáticos, mas para cargas que variam com o tempo. Mesmo sendo submetidas a tensões menores do que a própria resistência do material, essas estruturas falham, porque as tensões foram repetidas com grande frequência. Esse tipo de falha é conhecido por fadiga [34].

O processo de falha por fadiga ocorre em três estágios: iniciação de microfissuras; propagação das fissuras; e fratura do material. As microfissuras, impercetíveis a olho nu, surgem por deformação plástica cíclica numa escala microscópica, surgindo de forma rápida. Em seguida, as microfissuras evoluem para microfissuras, caracterizando o segundo estágio; e, por fim, quando o material remanescente não é capaz de suportar as cargas, a fratura sucede de forma rápida [34].

Os danos por fadiga são irreversíveis e cumulativos ao longo do tempo. Embora possa ser prevista a ocorrência de falha do material, os estudos nessa área, bem como a monitorização das estruturas, são essenciais para prever a sua ocorrência, evitando-a atempadamente. Da Figura 3.38 à Figura 3.40 [35] mostram-se secções de cabos que sofreram rutura por fadiga, vistas ao microscópio eletrónico de varredura (MEV), num estudo realizado em 2015 para analisar as falhas em cabos de aço na construção civil. Segundo este estudo, é possível analisar que a rotura ocorreu por fadiga quando a superfície apresenta zonas planas e rugosas [35].

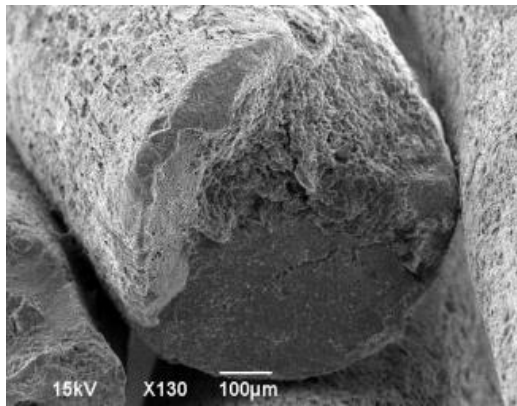


Figura 3.38 - Fratura por fadiga de um fio de aço; nota-se uma superfície plana seguida de outra rugosa

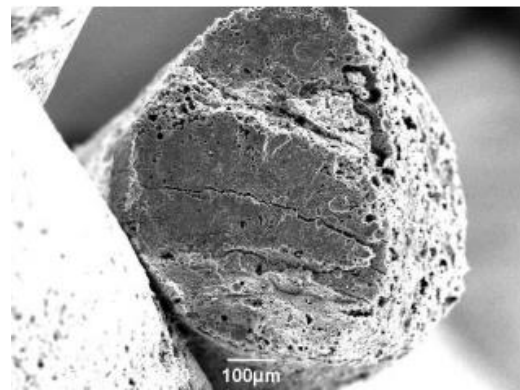


Figura 3.39 - Fratura por fadiga de um fio desgastado; nota-se a superfície plana seguida de outra rugosa

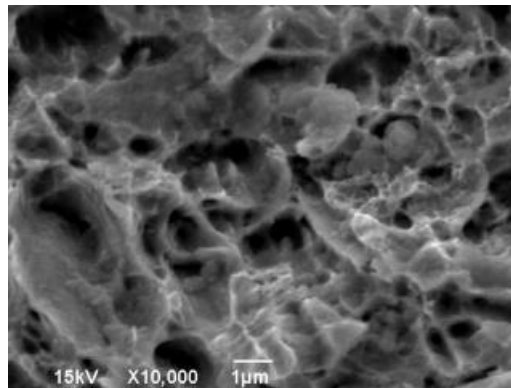


Figura 3.40 - Vista em microscópio de um fio que sofreu rotura por fadiga

No que respeita às pontes de tirantes, os cabos são elementos estruturais propícios à vibração. Considera-se que a frequência natural típica dos cabos varia entre 0,2 a 3 Hz. Segundo Caetano *et al.* (2000) [13], o fato dos correspondentes modos de vibração fundamentais apresentarem esta variação de frequências naturais, associado às sobrecargas, torna os elementos propícios a vibrações que podem influenciar de maneira direta a sensibilidade à fadiga. Durante a vida útil da obra pode haver muitos ciclos de variação de tensões, pelo que nos períodos de maiores amplitudes de oscilação podem ocorrer danos nos tirantes por fadiga [13].

Acresce que os cabos têm um comportamento elástico extremamente flexível e baixo amortecimento, ou seja, têm baixa capacidade de dissipar energia e isso também os torna sensíveis à rotura por fadiga.

### 3.5.4 Flexão e corte dos cordões

Os tirantes são peças sujeitas a esforço axial, mas junto às amarrações, se estas não estiverem orientadas segundo o eixo dos cabos, a força deixa de ser puramente axial, tendo uma componente transversal que pode provocar flexão e corte.

As tensões introduzidas por estes esforços podem ser muito maiores que as devidas à força axial. Isto pode provocar a rotura fadiga, que não ocorreria só com esforço axial.

### 3.5.5 Abrasão e batimento dos cordões

A inexistência ou ineficácia dos dispositivos de centragem causam o contacto direto e batimentos entre os cordões e os tubos de proteção e antivandalismo, o pode promover o corte do revestimento de proteção dos cordões e gerar, conseqüentemente, a sua abrasão.

É importante apontar um outro problema, relacionado com a inexistência dos dispositivos de centragem ou selagem, que consiste na entrada de água para o interior do tubo antivandalismo e também para as ancoragens dos tirantes [36].

Na Figura 3.41 [36] mostra-se um exemplo do revestimento de proteção degradado junto aos tubos de antivandalismo.



Figura 3.41 - Exemplo da inexistência ou ineficácia de dispositivos de centragem dos cabos

### 3.5.6 Oscilações e vibrações dos tirantes

As oscilações do tabuleiro e/ou das torres podem originar amplificações significativas de vibrações nos tirantes. Numa primeira abordagem, importa identificar os diferentes fenómenos de vibrações dos tirantes, que se podem classificar em duas categorias: as vibrações diretas, induzidas pelo vento e chuva; e as vibrações indiretas, decorrentes da oscilação das ancoragens. Este problema de excitação aerodinâmica pode ser mitigado através a utilização de nervuras helicoidais nos tirantes.

Outra anomalia importante a ser apontado nos dispositivos que compõe o sistema de tirantes, é a utilização inadequada ou a falta das braçadeiras, que com o tempo ficam desgastadas e podem soltar-se, permitindo que estas oscilações ou vibrações aconteçam nos tirantes, com o vento (Figura 3.42) [36].

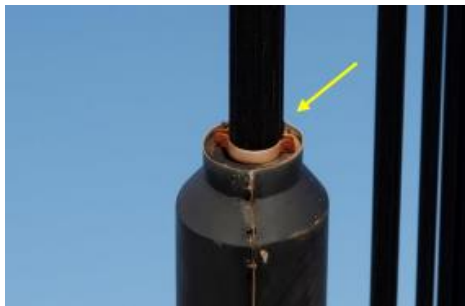


Figura 3.42 - Exemplo de braçadeira solta permitindo oscilações dos tirantes devido ao vento

A vibração do tabuleiro e dos próprios tirantes cria desvios no alinhamento dos cabos com as ancoragens, que introduzem flexão, por isso os amortecedores também são importantes, para reduzirem essas oscilações. Assim, a ausência ou a utilização inadequada de amortecedores pode gerar problemas de fadiga nos cabos [37].

### 3.5.7 Revestimento dos tirantes

As anomalias no revestimento de proteção dos tirantes aceleraram significativamente a degradação do sistema. Da Figura 3.43 à Figura 3.45 [31] mostram-se algumas anomalias que podem surgir com a degradação dos tubos ou enrolamentos de revestimento e dos tubos antivandalismo [31].



Figura 3.43 - Destaque do revestimento do enrolamento de proteção dos tirantes



Figura 3.44 - Líquenes e fungos no revestimento do enrolamento de proteção dos tirantes



Figura 3.45 - Exemplo de um tubo antivandalismo danificado

### 3.6 Anomalias de origem química

A corrosão diminui a capacidade de carga de elementos de aço devido à redução de secção, além de acelerar a fadiga.

A corrosão pode ser graduada em níveis. São recomendadas ações de mitigação, de acordo com a intensidade da oxidação. A corrosão, se for superficial, pode ser limpa, requerendo apenas a reposição da proteção superficial. Quando a corrosão provoca uma diminuição significativa dos fios, estes devem ser substituídos (Figura 3.46) [38].



Figura 3.46 - Gravidade de corrosão, em termos percentuais (0%, 40% e 60% respetivamente)

Os mecanismos de rotura do aço pré-esforçado, por corrosão, são essencialmente devidos a: (i) corrosão sob tensão; e (ii) fragilização por hidrogénio. Apesar de não serem frequentemente observados em estruturas pré-esforçadas, para além desses mecanismos são ainda referidos: (iii) corrosão por atrito; e (iv) corrosão por fadiga.

### 3.6.1 Corrosão sob tensão

A rotura de cabos de aço pode ocorrer por um processo designado por corrosão sob tensão, devido à fragilidade do seu sistema de proteção anticorrosivo nas proximidades de zonas de acoplamento das armaduras, sob a interface entre os diferentes componentes do sistema de proteção. Segundo Correia *et al.* (2014) [39], a corrosão sob tensão resulta da utilização de um material suscetível sob esforços de tração num ambiente agressivo que favoreça a ocorrência de corrosão [38].

A ocorrência da corrosão sob tensão é condicionada pelas propriedades do material, sendo que, em particular para os aços de pré-esforço, se regista um aumento da sua suscetibilidade com o aumento da sua resistência [38].

### 3.6.2 Fragilização por hidrogénio

No caso de corrosão localizada por picadas, a hidrólise dos catiões no interior da picada e a separação espacial das zonas anódicas e catódicas promove localmente a diminuição do pH e a depleção de oxigénio com consequente propagação da corrosão. A corrosão por picadas caracteriza-se pela quebra localizada do filme, geralmente na presença de espécies aniónicas agressivas, como os iões cloreto. A ação destas espécies ocorre localmente e não em toda a superfície, criando zonas anódicas ativas no metal. As zonas anódicas apresentam uma elevada densidade de corrente que se traduz numa elevada velocidade de corrosão no metal, resultando na formação de uma picada. Segundo Correia *et al.* (2014) [38], também no caso da fragilização por hidrogénio se regista um aumento da suscetibilidade à corrosão com o aumento da resistência mecânica em aços pré-esforçados [38].

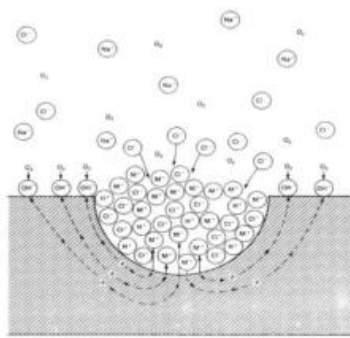


Figura 3.47 - Processo autocatalítico numa picada de corrosão

### 3.6.3 Corrosão por atrito

A corrosão por atrito corresponde ao dano que ocorre na interface entre duas superfícies sobre as quais existe uma carga, sujeitas a leve movimento oscilatório de baixa amplitude. O termo "corrosão por atrito" é usado quando uma das superfícies, ou produto do desgaste, sofre oxidação. Para ocorrer a corrosão por atrito, as interfaces devem estar sob pressão, deve haver movimento relativo repetido entre as duas superfícies e, finalmente, tanto a carga como o movimento relativo das superfícies devem ser suficientes para produzir deslizamentos ou deformação superficial [39].

### 3.6.4 Corrosão por fadiga

A corrosão por fadiga é um fenómeno de degradação causado pela sinergia entre solicitações mecânicas cíclicas e a natureza corrosiva do ambiente, o que pode levar a uma diminuição da vida operacional de componentes expostos a estas condições. Mais especificamente, a corrosão por fadiga refere-se à combinação de um ambiente agressivo com esforços mecânicos cíclicos, causando assim danos ou falha no material. Este fenómeno ocorre em aços e em outras ligas metálicas e está intimamente relacionado com a interação eletroquímica de um metal deformado localmente, ou seja, energeticamente suscetível a perda de átomos na região com o ambiente agressivo que o circunda (testes de corrosão-fadiga *SourTec*) [40].

### 3.6.5 Corrosão por agentes externos

Existem agentes externos que podem gerar e/ou acelerar o processo de deterioração dos elementos em aço, o que poderá comprometer a integridade da estrutura. Estes podem estar relacionados com o alto teor de humidade presente no ar, temperaturas elevadas, proximidade do mar devido a maior concentração de sal no ambiente, poluição industrial devido ao alto teor de dióxido de enxofre ou até mesmo a interação entre agentes naturais como o gás oxigénio presente no ar e átomos da superfície de metal.

### 3.7 Anomalias com origem em soluções construtivas

O sistema de tirantes também pode apresentar anomalias com origem em soluções construtivas. Estas anomalias podem ser atribuídas a deficiências do projeto, a defeitos dos materiais estruturais ou a inadequados processos construtivos da ponte.

Importa ter presente que determinados princípios, processos de cálculo e de execução, procedimentos e “regras de arte” que eram considerados corretos e adequados no tempo em que as pontes mais antigas foram projetadas e construídas são, atualmente, apontados como incorretos, inadequados e causadores de determinadas anomalias. A atribuição da origem de uma anomalia a deficiências de projeto ou da construção da ponte deve, portanto, ser encarada no contexto de uma avaliação feita com um enquadramento tecnológico complementemente diverso do que existia na época da construção da ponte [26].

Os erros de projeto podem ocorrer devido a uma conceção inadequada, uma análise estrutural pouco rigorosa, um subdimensionamento dos elementos estruturais ou a uma pormenorização deficiente.

No que toca aos defeitos de execução, deve-se estar atento à qualidade e durabilidade dos materiais utilizados, se os materiais possuem algum defeito de fabrico e se o processo de montagem foi executado de forma correta [26].

As anomalias comumente encontradas no sistema de tirantes e que estão relacionadas com deficiência das soluções construtivas relacionam-se com danos no sistema de proteção da superfície dos cabos, anomalias na calafetagem das bandas dos cabos, acumulação de água do sistema de ancoragem, drenagem deficiente das ancoragens ou cabos sem condutas de proteção (Figura 3.48) [31].



Figura 3.48 - Exemplo de infiltração de água na ancoragem do tirante no tabuleiro

## REABILITAÇÃO DOS TIRANTES DE DUAS PONTES PORTUGUESAS

### 4.1 Considerações iniciais

Apresentam-se e detalham-se dois casos de estudo, relativos a pontes de tirantes, em que houve uma degradação dos tirantes que obrigou à sua substituição. São a ponte Edgar Cardoso, na Figueira da Foz, sobre o rio Mondego, e a ponte Internacional do Guadiana, em Castro Marim, que foram as duas primeiras pontes atirantadas construídas em Portugal, em 1982 e 1991, respetivamente. Apresenta-se também o sistema de monitorização implementado em ambas as pontes, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Na ponte Internacional do Guadiana os tirantes foram já substituídos, ao passo que na ponte Edgar Cardoso prevê-se que os trabalhos de substituição dos tirantes sejam iniciados a curto prazo.

### 4.2 Ponte Edgar Cardoso

#### 4.2.1 Descrição geral da obra

A ponte Edgar Cardoso (Figura 4.1) [32], sobre o rio Mondego, foi projetada pelo Prof. Edgar Cardoso e inaugurada em 1982, sendo considerada a primeira ponte atirantada em Portugal.

A obra é constituída pela ponte atirantada, que transpõe o rio Mondego, e por dois viadutos de acesso, perfazendo um comprimento total de 1350 m. A ponte tem três vãos, tendo o vão central 225 m e os vãos laterais 90 m, perfazendo uma extensão total de 405 m (Figura 4.2) [41].



Figura 4.1 - Ponte Edgar Cardoso. Vista geral

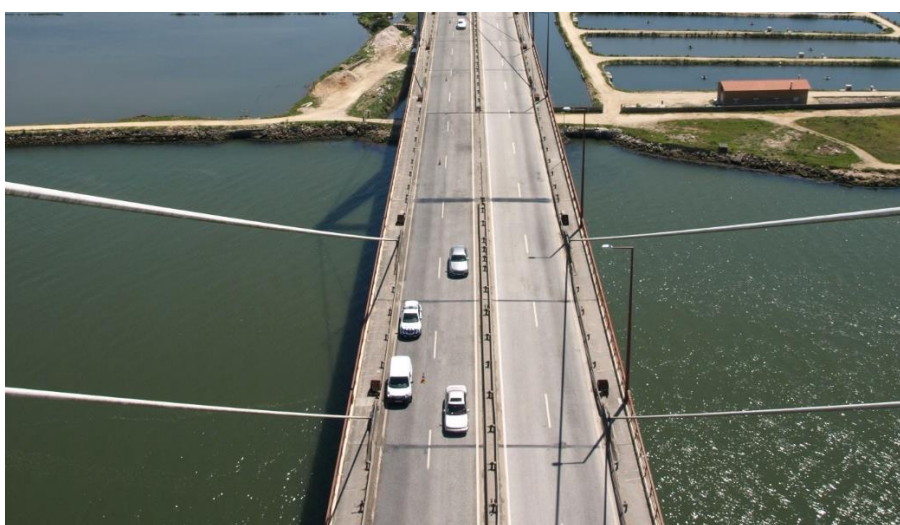


Figura 4.2 - Ponte Edgar Cardoso. Vista de um trecho do tabuleiro

#### 4.2.1.1 Tabuleiro

O tabuleiro, composto por uma estrutura mista de aço e betão, tem 20,6 m de largura, com duas faixas de rodagem de 7,5 m cada, dois passeios laterais sobrelevados de 2,3 m cada e um separador central com 1,0 m. É constituído por uma laje de betão armado suportada por uma estrutura em aço com duas vigas principais laterais, longarinas intermédias e carlingas (Figura 4.3) [41].

Cada viga principal é constituída por duas vigas gémeas de secção em I, de alma cheia, com altura de 2,0 m. As vigas principais estão afastadas 17 m e dão fixação aos tirantes de suspensão, entre cada par de I.

As carlingas, com secção em I, interligam as vigas longitudinais e são também vigas de alma cheia com 2 m de altura.

As carlingas dão ainda apoio a quatro longarinas intermédias, constituídas por perfis HE 600A, espaçados de 3,2 m entre si. As longarinas são contraventadas nos banzos inferiores por metades de perfis HE360A.

A espessura da laje varia entre 0,13 m no vão e 0,20 m sobre as longarinas.

No vão central da ponte existe um tramo isostático com 30 m de comprimento, que faz a transição entre os troços suspensos pelos tirantes das duas torres. Este tramo está apoiado em apoios móveis do tipo rolete metálico com guiamento longitudinal, na extremidade norte, e em apoios fixos do tipo rótula cilíndrica, na extremidade sul [42].



Figura 4.3 - Ponte Edgar Cardoso. Vista inferior do tabuleiro

#### 4.2.1.2 Torres

As torres, de betão armado e formato em A, são constituídas por quatro fustes inclinados de secção retangular vazada, unidos dois a dois no topo através de uma travessa de secção quadrada, também oca (Figura 4.4) [31]. Ao nível do tabuleiro, as torres estão interligadas por vigas de travamento, nas quais estão apoiadas as vigas principais dos tramos suspensos (Figura 4.5) [31].

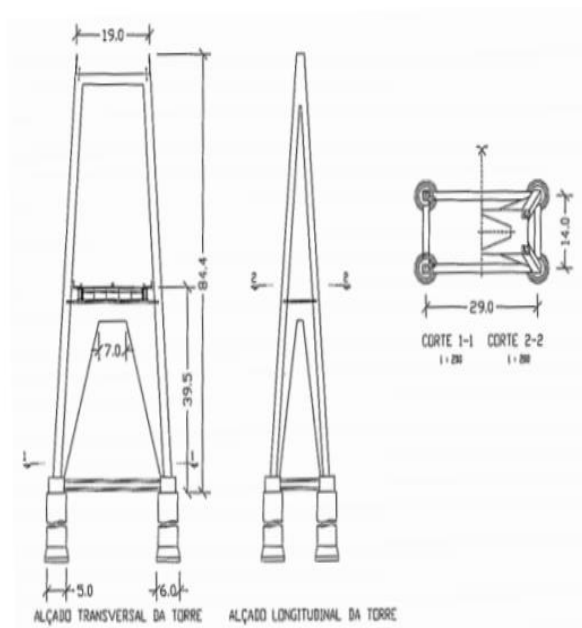


Figura 4.4 - Ponte Edgar Cardoso. Geometria e dimensões das torres (Rito *et al.*, 2005)



Figura 4.5 - Ponte Edgar Cardoso. Vista da torre sul (Fonte: LNEC)

#### 4.2.1.3 Sistema de suspensão

A suspensão do tabuleiro é realizada através de 6 tirantes contínuos em cada torre, dispostos em forma de leque, desviados em selas localizadas no topo das torres (Figura 4.6) [32]. Ao nível do tabuleiro, os tirantes são ancorados nas vigas principais (Figura 4.7) [31], com intervalos de 30 m. Os tirantes são constituídos por fios de aço galvanizado, protegidos por fios de aço de enrolamento, galvanizados e pintados, que se ramificam em conjuntos de fios na zona das ancoragens [41].

Os tirantes mais longos são constituídos por 900 fios, os de comprimento intermédio por 540 fios e os mais curtos por 390 fios.



Figura 4.6 - Ponte Edgar Cardoso. Selas de desvio dos tirantes no topo das torres



Figura 4.7 - Ponte Edgar Cardoso. Ancoragens inferiores dos tirantes nas vigas principais

O tabuleiro da ponte está apoiado nas torres através de aparelhos de apoio metálicos do tipo rótula cilíndrica e nos pilares de transição através de aparelhos de apoio do tipo rótula em U. O tabuleiro tem fixação vertical nos pilares de transição através de barras de aço de alta resistência.

#### **4.2.1.4 Fundações**

As fundações das torres são semidiretas através de poços de fundação, ocos de 5,0 m de diâmetro exterior, interligados por vigas de travamento, pré-esforçadas [41].

#### **4.2.1.5 Viadutos de acesso**

O viaduto de acesso da margem norte tem um comprimento de 315 m e está dividido em sete tramos, suportados por um encontro e sete pilares, enquanto o viaduto da margem sul tem 630 m de comprimento e está dividido em catorze tramos, apoiados no encontro sul e em dez pilares. Em planta, o viaduto da margem sul desenvolve-se numa curva com raio de 613,6 m, sendo a restante obra em alinhamento reto [41].

Os tabuleiros dos viadutos de acesso são formados por uma laje vigada de betão armado pré-esforçado (Figura 4.8) [31]. Os pilares dos viadutos são constituídos por duas colunas retangulares de secção vazada, ligadas no topo por uma travessa. As fundações dos pilares são constituídas por pegões. Os encontros têm um muro testa e dois muros de avenida, são do tipo de cofre de betão armado, e os muros de avenida apresentam uma configuração em harmónio [41].



Figura 4.8 - Ponte Edgar Cardoso. Vista geral do viaduto de acesso norte

## 4.2.2 Anomalias nos tirantes

De um modo geral, os fios dos tirantes apresentam descasque da camada de proteção, situação que favorece a sua degradação através do processo de corrosão. Em alguns tirantes há fios partidos e sem tensão nas ancoragens no tabuleiro, sendo no lado jusante a deterioração mais grave. Há também infiltrações e umidade nas ancoragens (Figura 4.9 à Figura 4.11) [31].

Ao nível da faixa de rodagem, o revestimento dos tirantes encontra-se degradado e com acumulação de líquenes (Figura 4.12) [31].

Nos topos das torres, os elementos metálicos das selas de desvio apresentam ligeiros sinais de corrosão nas ligações aparafusadas, assim como algum desgaste do revestimento por pintura (Figura 4.14) [31].



Figura 4.9 - Ponte Edgar Cardoso. Infiltração de água da chuva em ancoragem do tirante, ao nível do tabuleiro



Figura 4.10 - Ponte Edgar Cardoso. Descasque da camada de proteção dos fios e corrosão



Figura 4.11 - Ponte Edgar Cardoso. Fios partidos em tirante e corrosão

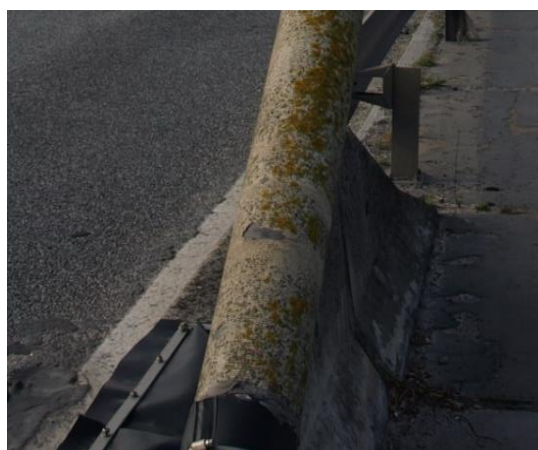


Figura 4.12 - Ponte Edgar Cardoso. Descasque do revestimento e proteção e acumulação de líquenes

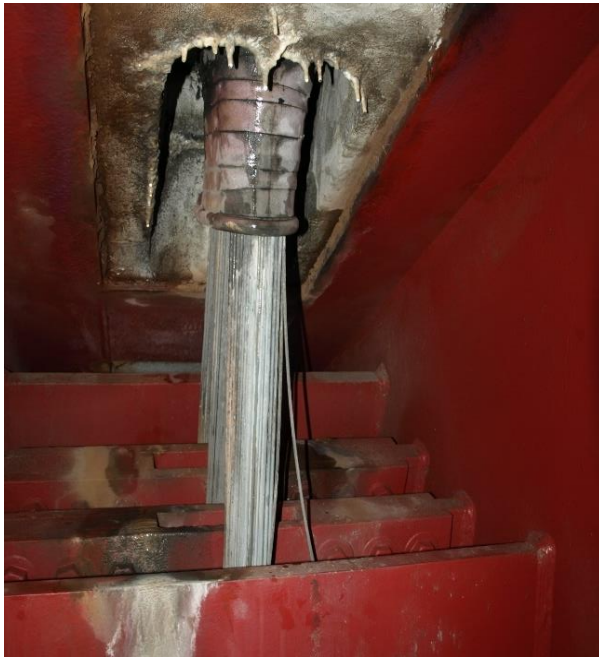


Figura 4.13 - Ponte Edgar Cardoso. Humidade e fio partido em tirante



Figura 4.14 - Ponte Edgar Cardoso. Corrosão e descasque da camada de revestimento na sela de desvio de tirante, no topo da torre

### 4.2.3 Sistema de monitorização

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) [43] instalou um sistema de monitorização estrutural na Ponte Edgar Cardoso, que permite avaliar a evolução de diversas grandezas ao longo do tempo, designadamente, extensões, deslocamentos, temperaturas no tabuleiro, temperatura e humidade relativa do ar e velocidade e rumo do vento (Figura 4.15) [43].

A medição dos valores obtidos com os sensores instalados na estrutura é efetuada automaticamente com recurso a data loggers, que se encontram ligados por meio de uma rede interna a uma unidade de controlo, que por sua vez se encontra ligada a um computador pessoal, que permite fazer a gestão e o pré-tratamento dos dados obtidos. Este computador é acessível, remotamente, por meio de um router celular, que permite o controlo remoto do sistema de aquisição e também a transmissão dos dados obtidos [43].

O armazenamento e a disponibilização destes dados são efetuados num servidor através de uma página Web que pode ser acedida unicamente pelos intervenientes neste processo. As medições dos diferentes sensores encontram-se disponíveis sob a forma de gráficos e ficheiros de dados [43].

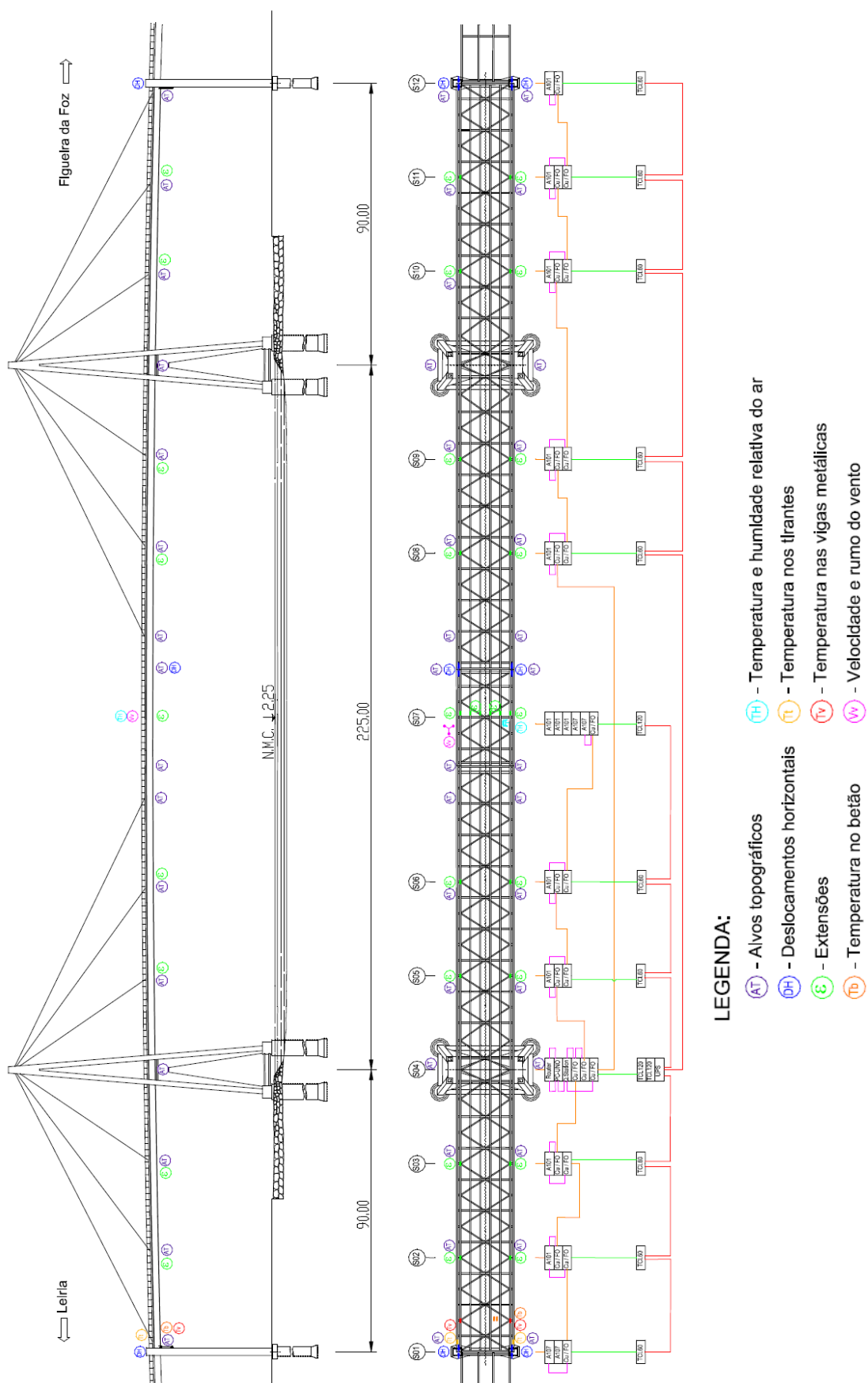


Figura 4.15 - Sistema de monitorização implementado na ponte Edgar Cardoso

## 4.2.4 Proposta de substituição dos tirantes

### 4.2.4.1 Aspetos gerais

A ponte Edgar Cardoso sofreu, ao longo dos anos, várias intervenções, com o objetivo de solucionar deteriorações e anomalias, e assim prolongar a sua vida útil. Destacam-se os estudos de reabilitação realizados entre 1998 e 2001, com obras concluídas em 2006, e a intervenção nas bases das torres realizada em 2013. Contudo, nas inspeções realizadas identificaram-se outras anomalias, principalmente no que respeita ao sistema de atirantamento.

A solução de reabilitação dos tirantes, estudada por Rito *et al* (2021) [44], aponta para a substituição do sistema de tirantes, melhoramento do sistema de retenção no tabuleiro nos pilares de transição e melhoramento da capacidade resistente das torres e da integridade dos pilares de transição.

A reabilitação dos tirantes será dividida em três fases: a primeira consiste na instalação de um sistema de tirantes provisórios, incluindo as ancoragens no tabuleiro e nas torres, seguida da desinstalação do sistema atual e, por fim, a instalação do sistema novo e definitivo. No projeto houve que superar algumas limitações que serão adiante apontadas. A Figura 4.16 [31] apresenta a numeração dos cabos dos tirantes da ponte [44,45].

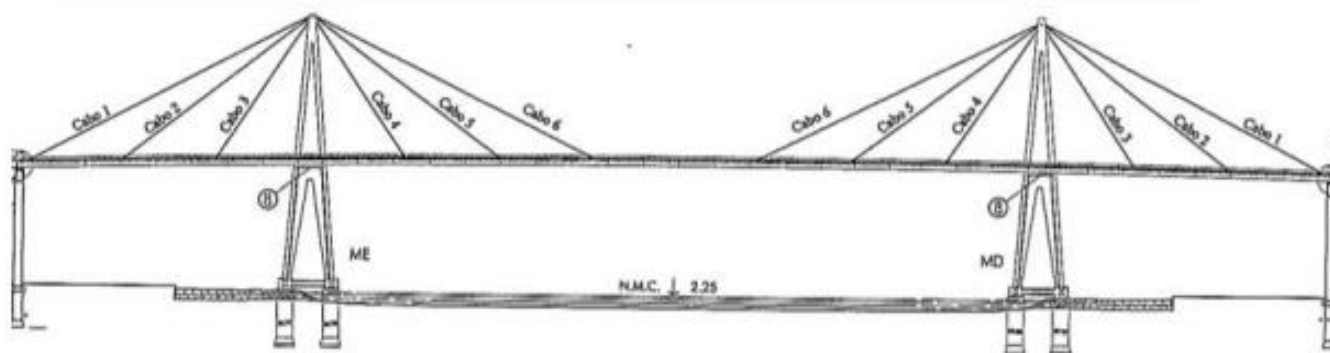


Figura 4.16 - Ponte Edgar Cardoso. Numeração dos tirantes

### 4.2.4.2 Limitações do projeto

A primeira limitação encontrada está relacionada com o comportamento estrutural da ponte. A partir dos resultados da análise estrutural, chegou-se à conclusão de que não seria possível simplesmente ir retirando e substituindo os tirantes, um a um, sendo necessário instalar um sistema provisório de tirantes [44,45]. Isto se deu devido a própria redundância do sistema estrutural desta ponte, designadamente a distância entre a ancoragem dos tirantes ao longo do tabuleiro que gera problemas de flexão no tabuleiro. Outro fator que pode contribuir significativamente para isto é o fato de existir um tramo isostático bi-apoiado nos dois troços atirantados do tabuleiro no meio do vão central.

Houve também limitações ligadas à ancoragem dos tirantes nas selas de desvio no topo das torres e também com a ancoragem no tabuleiro dos tirantes 1 e 6.

#### 4.2.4.2.1 Dificuldades de ancoragem no topo das torres: selas de desvio

Não existe espaço disponível no topo das torres para a instalação dos tirantes provisórios. As selas de desvio existentes ocupam o topo das peças de betão quase por completo. A travessa existente é composta por uma secção oca, que não tem capacidade resistente para dar apoio às selas provisórias (Figura 4.17) [44,45].



Figura 4.17 - Ponte Edgar Cardoso. Sela de desvio atual no topo da torre norte (montante)

#### 4.2.4.2.2 Dificuldades de ancoragem no tabuleiro: tirantes 1 e 6

Nos tirantes 1 e 6 há limitações devido à posição das ancoragens no tabuleiro, estas tiveram de ser ajudas consoante às suas singularidades.

O tirante 1 é um cabo de retenção e está ancorado no tabuleiro próximo do pilar de transição. O tirante de retenção desempenha um papel importante na estabilidade global da obra pois reduz os momentos fletores tanto nas torres como no tabuleiro, quando submetidos carregamentos assimétricos (Figura 4.18) [44,45]. Sua ancoragem ao nível do tabuleiro será

feita de forma diferente pois nesta zona convergem muitos sistemas da ponte, além da amarração deste tirante (provisório e definitivo), os atuais sistemas de fixação do tabuleiro aos pilares, os aparelhos de apoio, as fixações longitudinais, etc.



Figura 4.18 - Ponte Edgar Cardoso. Ancoragem do atual tirante 1 no tabuleiro (pilar de transição P7)

Para o tirante 6, que tem ancoragem no tabuleiro na zona central do vão principal, o cabo provisório não poderia estar muito afastado do apoio do troço central, devido a requisitos relacionados com a resistência estrutural, por se tratar se um trecho central simplesmente apoiado. Assim, tiveram de ser tidas em consideração estas particularidades e limitações em relação aos demais tirantes (Figura 4.19 e Figura 4.20) [44,45].



Figura 4.19 - Ponte Edgar Cardoso. Inserção do atual tirante 6, ao nível do tabuleiro



Figura 4.20 - Ponte Edgar Cardoso. Ancoragem do atual tirante 6 no tabuleiro

#### 4.2.4.3 Solução estrutural de substituição do sistema de tirantes

No projeto de reabilitação da ponte concluiu-se que a substituição dos tirantes deverá ser feita aos pares, de forma sequencial. Será feita a instalação do par de tirantes provisórios,

seguida da remoção do par existente, para depois se instalar o par definitivo, seguida da desinstalação do par provisório.

Os tirantes provisórios serão subdivididos em dois tirantes, cada um com metade do número de cordões previstos para estes tirantes. Os tirantes provisórios também têm as extremidades ancoradas no tabuleiro e nas torres, através do contacto nas superfícies curvas de selas provisórias [44,45].

Os novos tirantes definitivos serão ancorados no topo das torres, através de novas selas.

Apresentam-se, de seguida, as soluções de ancoragem previstas.

#### 4.2.4.3.1 Solução da ancoragem no topo das torres

Devido às dificuldades apontadas em relação às selas de desvio, será necessário construir selas provisórias antes das selas definitivas. Assim, serão construídas duas selas provisórias em cada um dos lados do topo da torre, instaladas lateralmente às selas atuais.

Para a construção das selas provisórias será instalada uma viga metálica de sustentação abaixo das selas atuais, no intervalo entre os dois maciços de betão onde assentam as selas existentes. A viga metálica dará apoio às selas provisórias. As forças provenientes das selas provisórias serão aplicadas à viga metálica e depois transferidas para a superfície do betão subjacente (Figura 4.21) [45]. A adoção desta travessa de sustentação facilita a movimentação e montagem do novo sistema, além de resultar num conjunto mais compacto e estável.

Apesar de se ter duplicado o número de selas provisórias, a solução de reabilitação escolhida é esteticamente equilibrada e permite que as forças dos tirantes se distribuam por duas selas que estão em posições quase simétricas relativamente ao eixo do fuste de betão. Além disso, devido ao facto destas selas provisórias se localizarem num nível mais baixo em relação à posição das selas atuais, foi possível evitar conflitos geométricos entre os tirantes existentes, os provisórios e os definitivos.

A viga metálica utilizada para apoiar as selas provisórias, com secção em caixão, tem elevada rigidez à torção para fazer face às sobrecargas no tabuleiro, sendo que as forças que se geram durante as operações de corte de fios e de esticamento progressivo dos novos cordões introduzem desequilíbrios nas forças nos tirantes e, consequentemente, esforços significativos de torção na viga.

Com o objetivo de encastrar a viga metálica, serão instaladas barras de pré-esforço que atravessarão a própria viga e os blocos de betão existentes. Serão ainda feitas injeções de *grout* para preencher os espaços entre as superfícies de aço de betão.

O projeto prevê também a instalação de macacos hidráulicos para minimizar os efeitos introduzidos pelo corte de fios e o tensionamento de cordões ao longo da mudança dos tirantes, ou seja, irão absorver os eventuais desequilíbrios que possam surgir durante a instalação os tirantes. Os macacos hidráulicos serão posicionados nas extremidades das selas provisórias, estarão apoiados sobre chapas metálicas, as quais transferem as suas cargas para os fustes das torres por intermédio do atrito mobilizado pelo aperto de barras de pré-esforço que atravessam o fuste lado a lado [44,45].

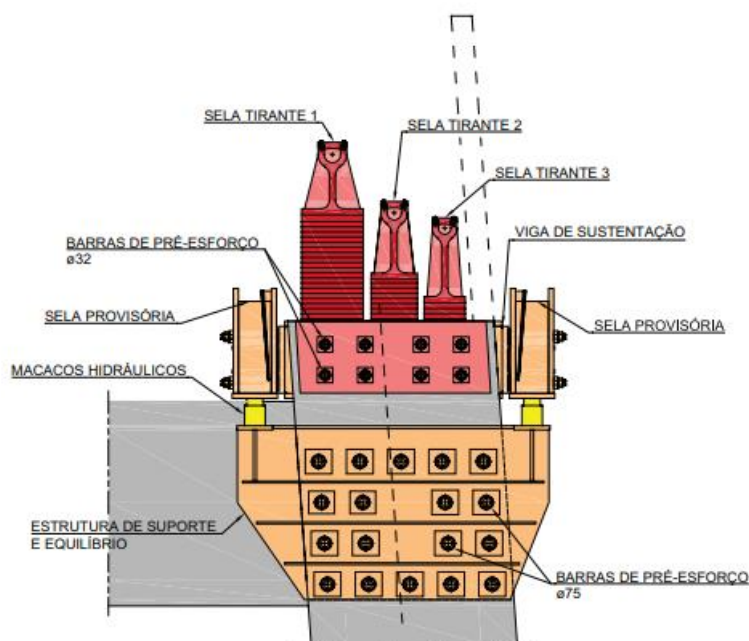


Figura 4.21 - Ponte Edgar Cardoso. Selas existentes e selas provisórias no topo das torres

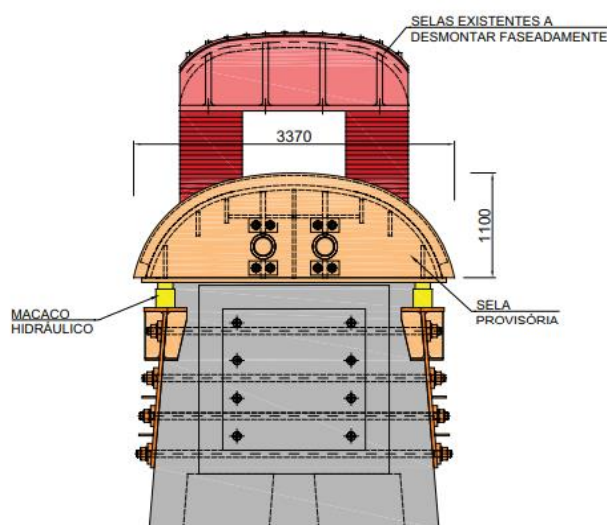


Figura 4.22 - Ponte Edgar Cardoso. Alçado das selas provisórias no topo das torres

Como solução, para a sela definitiva, será modificado o sistema de tirantes contínuos sobre as selas para dois tirantes distintos, ancorados de cada lado das torres. Os novos tirantes irão ancorar em blocos metálicos no topo das torres e as selas atuais serão desativadas e substituídas pelas futuras caixas de ancoragem dos tirantes definitivos, instaladas no mesmo local. As caixas metálicas de amarração terão geometria semelhante às das selas existentes, tanto no tamanho como na configuração das superfícies envolvidas (Figura 4.23) [45]. Dessa maneira é possível criar um espaço para serem colocadas as caixas de ancoragem definitivas enquanto são realizados os trabalhos necessários para a instalação dos tirantes. Esta mudança não irá comprometer, nem modificar de maneira significativa, o comportamento estrutural atual da ponte, com exceção da geometria dos tirantes, pois houve alteração do sistema de ancoragem e não se consegue reproduzir exatamente a geometria existente nas selas. Este novo sistema apresenta melhor comportamento em relação à fadiga e também aos efeitos causados pelas vibrações, além de ser mais resistente à degradação provocada pela presença de água (Figura 4.24 e Figura 4.25) [44,45].

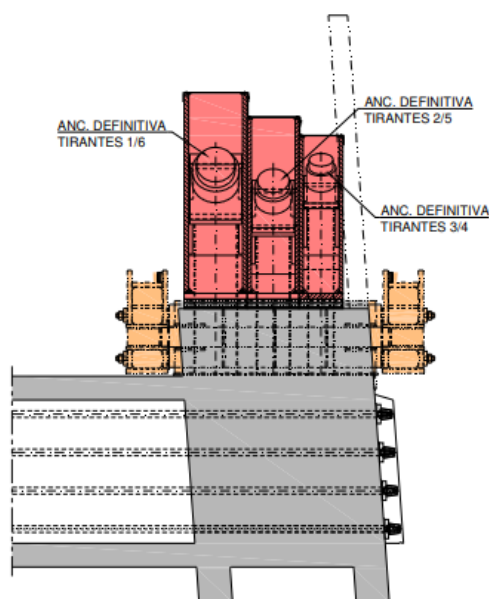


Figura 4.23 - Ponte Edgar Cardoso. Alçado transversal das peças de ancoragem definitivas no topo das torres

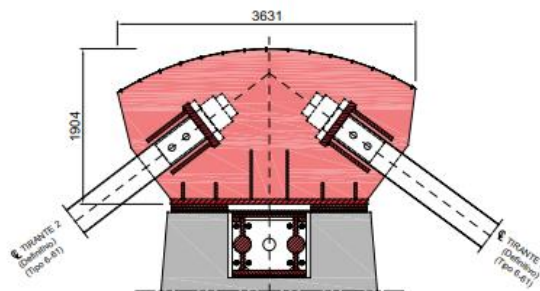


Figura 4.24 - Ponte Edgar Cardoso. Corte longitudinal pelas ancoragens definitivas no topo das torres

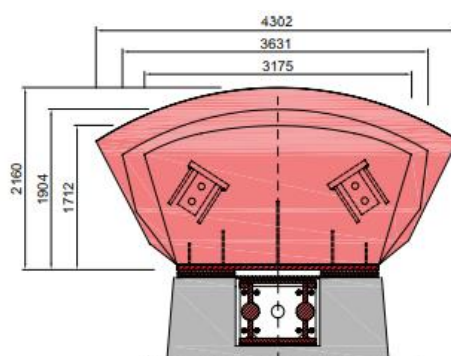


Figura 4.25 - Ponte Edgar Cardoso. Alçado longitudinal das ancoragens definitivas no topo das torres

#### 4.2.4.3.2 Solução da ancoragem no tabuleiro

Na solução de reabilitação pretendeu-se que os esforços atuantes fossem menores que a capacidade resistente das secções do tabuleiro, em todas as fases previstas na substituição dos tirantes, designadamente na situação atual, durante a suspensão provisória e após a instalação dos novos tirantes definitivos.

Com o objetivo de evitar intervenções de corte e soldadura de chapas de reforço nas zonas de ancoragem no tabuleiro, foi decido posicionar as novas ancoragens de cada tirante, tanto no caso dos provisórios como no dos definitivos, afastadas das posições atuais. Assim, as ancoragens provisórias e definitivas dos tirantes 2, 3, 4 e 5 foram posicionadas imediatamente antes e depois das ancoragens existentes (Figura 4.26) [44,45].

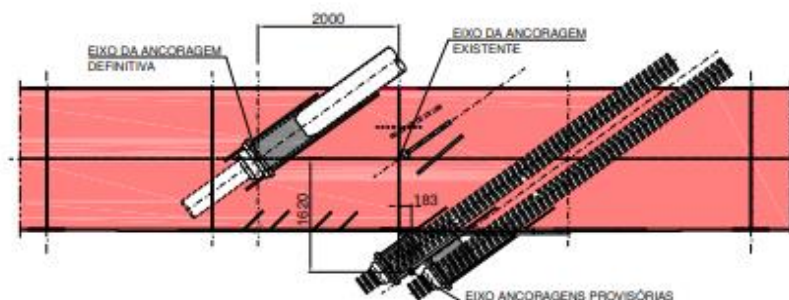


Figura 4.26 - Ponte Edgar Cardoso. Corte longitudinal da viga do tabuleiro com as ancoragens provisórias (direita) e definitiva (esquerda) dos tirantes 2 e 5.

Nos tirantes 1 e 6 foi necessário atender às singularidades e aos condicionamentos espaciais das zonas onde se inserem. Nestas duas situações, os tirantes provisórios são ancorados exteriormente às vigas do tabuleiro, solução que é diferente das restantes ancoragens.

No tirante 1 (retenção), as ancoragens provisórias e as definitivas serão posicionadas na interseção dos eixos das vigas com o eixo do apoio (Figura 4.27 e Figura 4.28) [44,45].

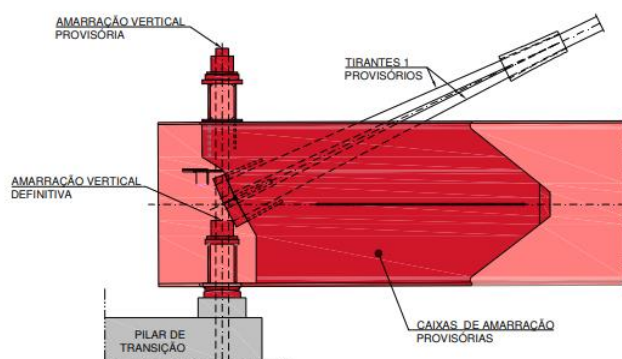


Figura 4.27 - Ponte Edgar Cardoso. Alçado da ancoragem provisória no tabuleiro para o tirante 1

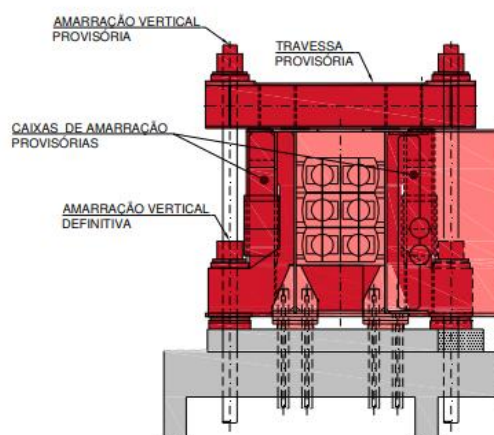


Figura 4.28 - Ponte Edgar Cardoso. Corte da ancoragem provisória no tabuleiro para o tirante 1

No tirante 6, situado mais próximo do trecho central simplesmente apoiado, não é possível aumentar a distância entre as ancoragens e os apoios do trecho central, uma vez que as vigas do tabuleiro não têm capacidade resistência suficiente (Figura 4.29) [44,45].

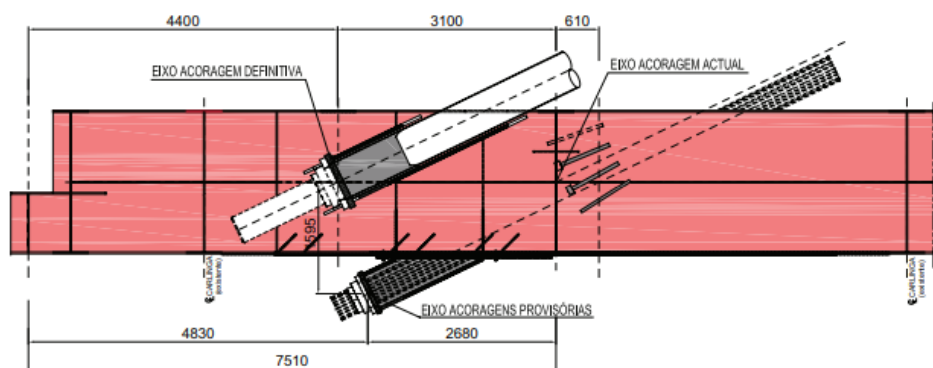


Figura 4.29 - Ponte Edgar Cardoso. Corte longitudinal com as ancoragens no tabuleiro do tirante 6, provisórias (inferior) e definitivas (esquerda)

#### 4.2.4.4 Outras intervenções propostas

Além da reabilitação do sistema de tirantes, foi proposto um novo sistema de fixação do tabuleiro nos pilares de transição, novos sistemas de limitação e bloqueio dos aparelhos de apoio do tramo simplesmente apoiado, a reabilitação de todo o sistema de proteção anticorrosiva do tabuleiro metálico da ponte, um sistema eficaz de proteção superficial do betão das torres, a substituição do sistema de iluminação viária, a impermeabilização e a repavimentação de todo o tabuleiro, entre outros.

### 4.3 Ponte Internacional do Guadiana

#### 4.3.1 Descrição geral da obra

A ponte Internacional sobre o rio Guadiana (Figura 4.30) [37] situa-se a 6 km da foz deste rio, a nordeste de Castro Marim, tendo a sua construção sido iniciada em 1988 e concluída em 1991. Trata-se de uma ponte de tirantes, com o tabuleiro constituído por 5 tramos, com comprimentos de 36 m, 135 m, 324 m, 135 m e 36 m, o que perfaz um comprimento total de 666 m [36].



Figura 4.30 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista geral de jusante

#### 4.3.1.1 Tabuleiro

O tabuleiro (Figura 4.31) [36] encontra-se suspenso pelos tirantes e apoia-se nos encontros, em dois pilares e em duas torres. O tabuleiro assegura, no vão central, um tirante mínimo de ar de 20 m em relação ao leito do rio, não tem juntas entre encontros e apresenta duas tipologias diferentes: nos tramos atirantados tem uma secção em caixão unicelular com 18 m de largura e 2,5 m de altura, rigidificada transversalmente, a cada 4,5 m, por carlingas trianguladas pré-fabricadas; e nos tramos extremos tem uma secção em caixão com contorno exterior idêntico, mas com três células [36].



Figura 4.31 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista inferior do tabuleiro

#### 4.3.1.2 Torres

As torres (Figura 4.32) [36] têm cerca de 100 m de altura e configuração em “Y” invertido. As pernas de cada torre fundam em maciços de encabeçamento que se apoiam em 13 estacas de 2 m de diâmetro. Os maciços estão ligados entre si por uma viga de betão armado pré-esforçado [36].



Figura 4.32 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista da torre do lado da Espanha

#### 4.3.1.3 Sistema de suspensão

Os tirantes encontram-se ancorados nas torres e nas zonas laterais do tabuleiro, distribuindo-se de igual modo entre os lados de montante e jusante. Em cada torre estão ancorados 64 tirantes, distribuindo-se em igual número para suspensão do tramo central e dos tramos laterais. O espaçamento longitudinal dos tirantes no tramo central tabuleiro é de cerca de 8,9 m (Figura 4.33 e Figura 4.34) [36].

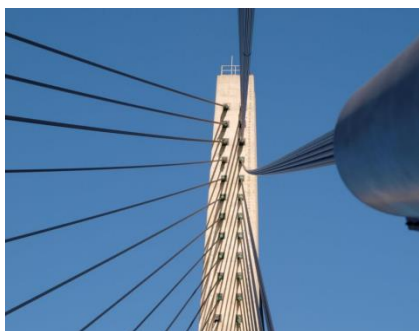


Figura 4.33 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista das entradas dos tirantes na torre



Figura 4.34 - Ponte Internacional do Guadiana. Vista geral do tubo antivandalismo no trecho inferior dos tirantes

### 4.3.2 Anomalias nos tirantes

Os resultados das inspeções realizadas à ponte indicaram a necessidade de uma intervenção para alterar o sistema de ancoragem dos tirantes, já que foram observadas algumas anomalias, designadamente cordões partidos (Figura 4.35) [36], degradação do revestimento de proteção dos cordões (Figura 4.36) [36], vibrações e pulsações fora do esperado, ancoragens

com vestígios de acumulação de água no interior dos capôs e corrosão (Figura 4.37) [36], e ainda alguns tirantes com perda de tensão (Figura 4.38) [36].



Figura 4.35 - Ponte Internacional do Guadiana. Cordão partido de um dos tirantes, junto à ancoragem na torre

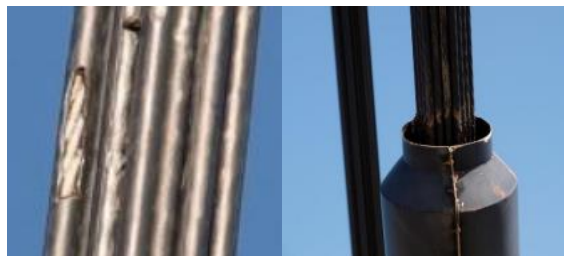


Figura 4.36 - Ponte Internacional do Guadiana. Degradação do revestimento dos cordões



Figura 4.37 - Ponte Internacional do Guadiana. Vestígios de água e corrosão na proteção de ancoragem

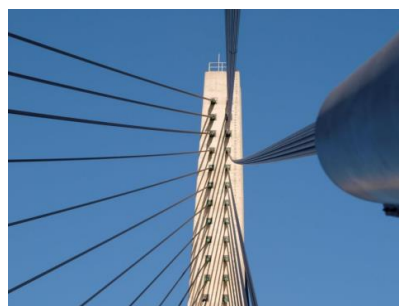


Figura 4.38 - Ponte Internacional do Guadiana. Perda de tensão (flecha no tirante)

Em 2018, após inspeções e ensaios, os tubos antivandalismo foram removidos e foram retiradas amostras para análise em laboratório. Foram então confirmadas as anomalias observadas nas ancoragens no tabuleiro, como corrosão, perda de secção dos cordões e sistema de revestimento dos cordões ineficiente (Figura 4.39 a Figura 4.41) [36].



Figura 4.39 - Ponte Internacional do Guadiana. Corrosão no sistema de vedação da ancoragem



Figura 4.40 - Ponte Internacional do Guadiana. Fios expostos junto à ancoragem



Figura 4.41 - Ponte Internacional do Guadiana. Humidade e corrosão em ancoragem no tabuleiro

Após a rotura de dois cordões nos anos seguintes, em 2020 foi identificada a rotura de um terceiro cordão. Foram realizadas novas inspeções e também ensaios não destrutivos. As anomalias apontadas, principalmente no que respeita às ancoragens, levou à decisão da substituição completa do sistema de tirantes da ponte.

### 4.3.3 Sistema de monitorização

À semelhança do que acontece na Ponte Edgar Cardoso, o LNEC [47] instalou, igualmente, um sistema de monitorização estrutural na Ponte Internacional sobre o Rio Guadiana. Este sistema permite avaliar a evolução de diversas grandezas ao longo do tempo, designadamente, extensões, deslocamentos verticais, temperaturas no tabuleiro, temperatura e humidade relativa do ar (Figura 4.42) [46].

A medição dos valores obtidos com os sensores instalados na estrutura é também efetuada automaticamente com recurso a data loggers de dois tipos. Uns operam independentemente outros encontram-se ligados a unidades de controlo. Os data loggers ou as respetivas unidades de controlo, encontram-se ligados por meio de uma rede interna a dois computadores pessoais, que permitem fazer a gestão e o pré-tratamento dos dados obtidos. Estes computadores são acessíveis remotamente, por meio de dois routers celulares, que permitem o controlo remoto do sistema de aquisição e também a transmissão dos dados obtidos [46].

Nesta ponte, o armazenamento e a disponibilização destes dados são, igualmente, efetuados num servidor através de uma página Web que pode ser acedida unicamente pelos intervenientes neste processo. As medições dos diferentes sensores encontram-se disponíveis sob a forma de gráficos e ficheiros de dados [46].

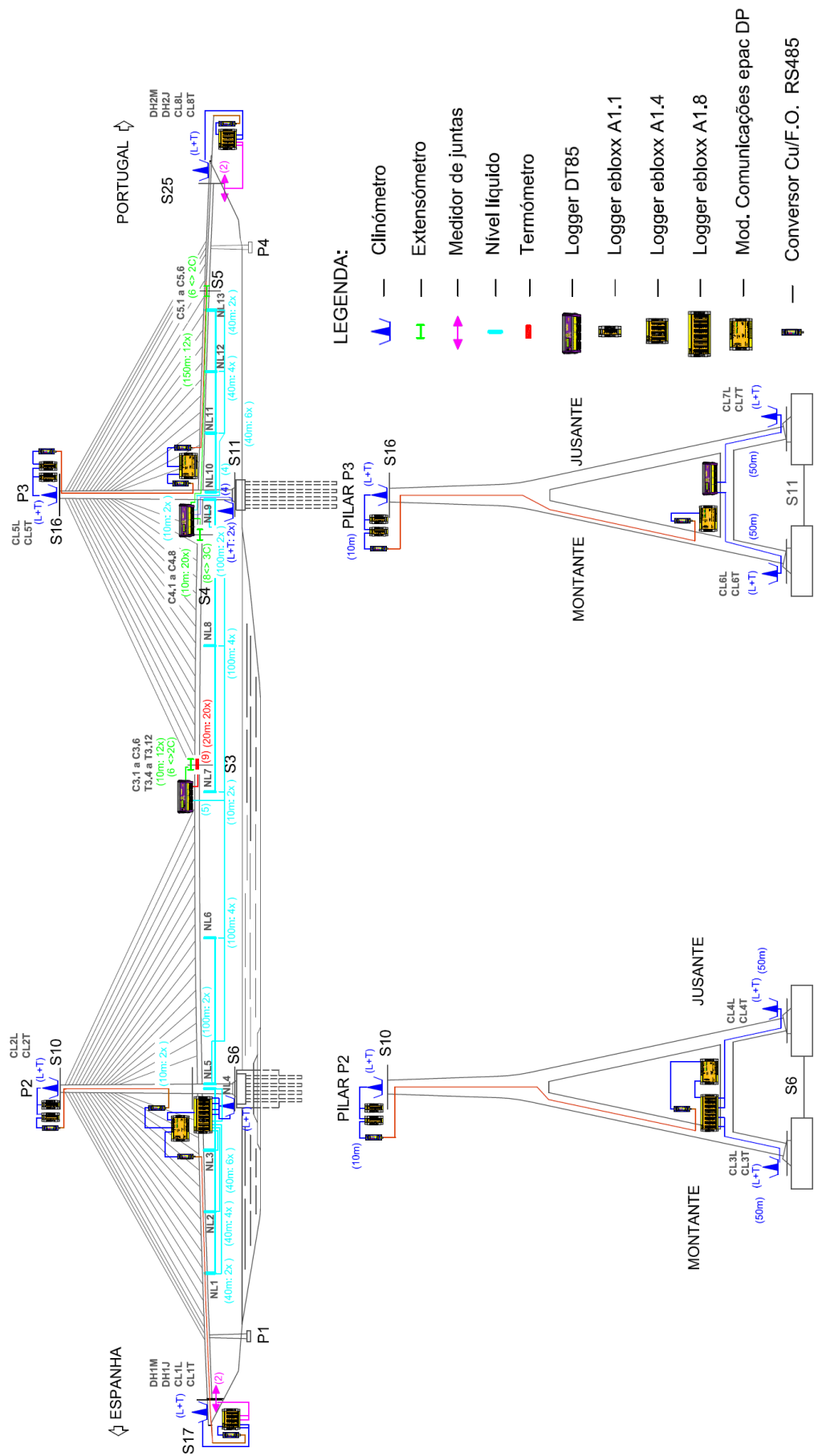


Figura 4.42 - Sistema de monitorização implementado na ponte Internacional do Guadiana

## 4.3.4 Reabilitação dos tirantes

### 4.3.4.1 Aspectos gerais

O afastamento longitudinal dos tirantes permitiu que fossem substituídos um a um, sem necessidade de instalação de tirantes provisório. Este aspecto facilitou, em muito, a realização dos trabalhos.

Os trabalhos de substituição dos tirantes foram concluídos em abril de 2021, tendo compreendido cinco períodos distintos (Martínez e Abecasis, 2020) [47,48]: remoção dos tirantes existentes, intervenções locais, instalação dos novos tirantes e amortecedores, tensionamento global dos tirantes e instalação de sensores para avaliação da força em alguns cordões.

O novo sistema de tirantes é de uma nova geração de ancoragens, tubos de proteção e amortecedores de vibração. O novo sistema tem monitorização automática, através de sensores do tipo *magneto-indutivos* do modelo *DYNA Force*, para a medição das forças nos cabos [48-49].

### 4.3.4.2 Remoção dos tirantes existentes

Os tirantes existentes foram individualmente afrouxados e removidos das ancoragens do tabuleiro e das torres. Foi retirada a tensão dos cabos, ao nível do tabuleiro, com o auxílio de uma peça metálica fixada na chapa existente na travessa inferior da viga e de um macaco hidráulico mono-cordão. Cada ancoragem foi removida do tabuleiro de maneira controlada, os cabos ficaram pendurados na torre e posteriormente foram cortados e removidos. Após a remoção do último fio, a ancoragem do tabuleiro foi retirada. A ancoragem na torre foi também retirada. Apenas não foram removidos as placas metálicas e os tubos cofrantes embebidos no betão no tabuleiro e da torre [47-48].

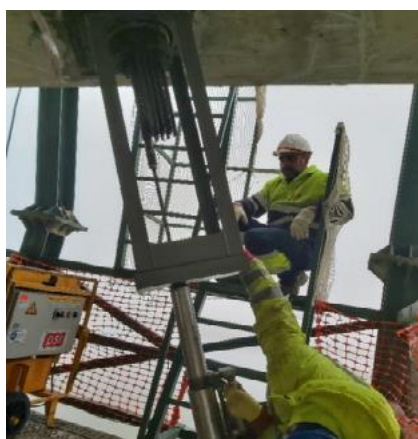


Figura 4.43 - Ponte Internacional do Guadiana. Retirada de tensão de um tirante



Figura 4.44 - Ponte Internacional do Guadiana. Ancoragens de tirante no tabuleiro após a remoção

#### 4.3.4.3 Intervenção nos elementos existentes

Os elementos que não foram removidos foram adaptados para acomodar o novo sistema de cabos. Realizou-se a correção dos desvios angulares nos tubos cofrantes e nas placas metálicas na ancoragem, bem como uma nova pintura anticorrosiva no revestimento de proteção. Todas as aberturas nas placas de ancoragem do tabuleiro tiveram de ser aumentadas, com o auxílio de um maçarico, para poderem acomodar as novas ancoragens. Para assegurar o suporte adequado da porca de fixação do bloco de ancoragem, foi colocada uma placa adicional sobre a placa existente. Essa nova placa foi projetada de maneira a permitir mudanças futuras, como o ajuste da força ou a inclinação dos tirantes, permitindo o uso de um macaco hidráulico, caso seja necessário. Já na torre não foi preciso aumentar o diâmetro da placa de ancoragem, visto que o modelo novo encaixava sem necessidade de efetuar alterações. Ao nível do tabuleiro, o tubo da ancoragem foi modificado para poder acomodar o novo tubo antivandalismo (Figura 4.45 e Figura 4.46) [47-48].

Na fase final, todos os tubos das torres e do tabuleiro foram preenchidos com um produto de proteção contra corrosão para evitar a entrada de água e a condensação.



Figura 4.45 - Ponte Internacional do Gadiana. trabalhos para aumento do diâmetro no tubo da ancoragem no tabuleiro



Figura 4.46 - Ponte Internacional do Gadiana. Placa metálica adicional na ancoragem no tabuleiro

#### 4.3.4.4 Instalação dos novos tirantes

Os novos tirantes são do sistema *DYNA Grip* (Figura 4.47) [47]. Este sistema permite a inspeção dos cordões (*strands*) individualmente, sem danificar o sistema dos tirantes. Também permite a substituição individual dos cordões, caso haja necessidade [47-48].

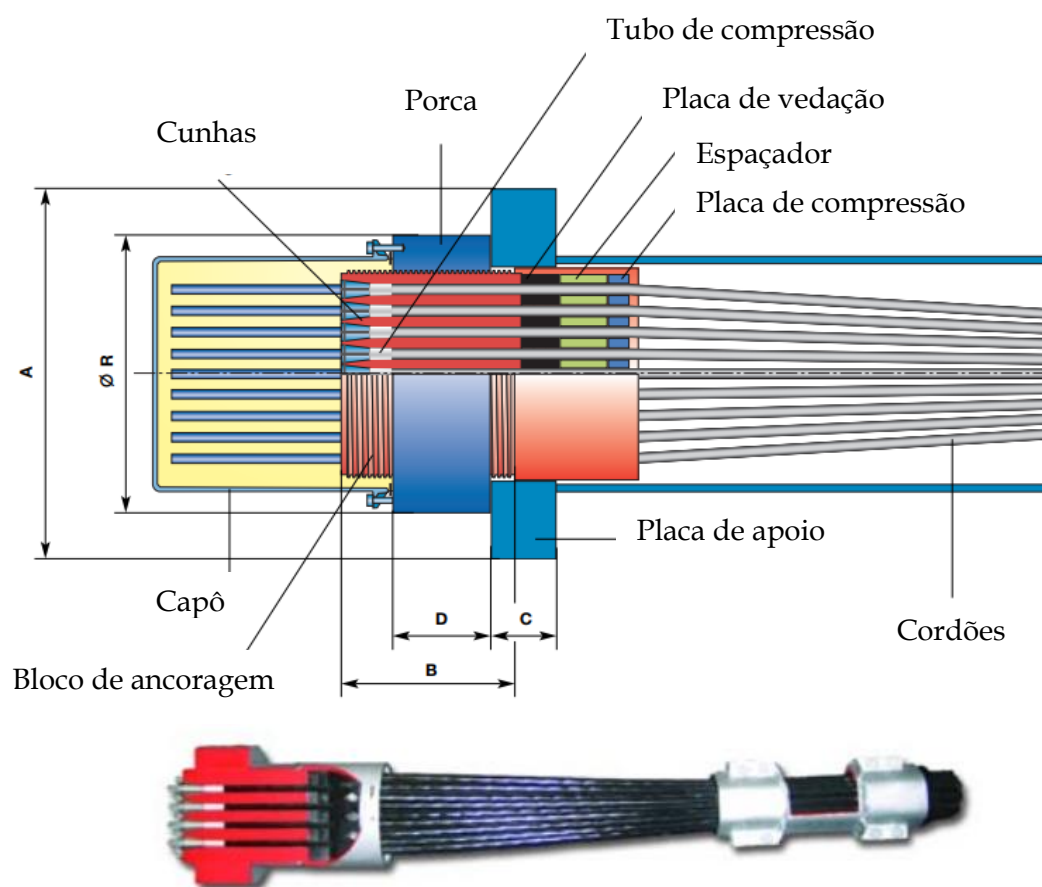


Figura 4.47 - Ponte Internacional do Guadiana. Sistema de ancoragem DYNA Grip

Primeiro foram instaladas as ancoragens, depois foi feita a elevação e a colocação do tubo de proteção e a instalação dos cordões, que foram depois tensionados, seguiu-se a instalação de grampos de compactação e o fechamento do tubo de revestimento, a aplicação da proteção anticorrosiva nas ancoragens e, por fim, a instalação de amortecedores externos. O comportamento dinâmico desses cabos, com mais de 130 m de comprimento, foi otimizado com a instalação dos amortecedores [47-48].

A proteção dos tirantes é realizada por vários trechos do tubo de polietileno (Figura 4.48) [48], que são soldados uns aos outros para obter o comprimento total. Após a soldagem dos tubos, foram instaladas a proteção antivandalismo e a manga nas extremidades do cabo [47-48].



Figura 4.48 - Ponte Internacional do Guadiana. Tubos HDPE (Polietileno)

A extremidade superior do tirante foi içada para o topo da torre e conectada a ela (Figura 4.49) [47-48]. Em seguida, a extremidade superior do primeiro cordão foi inserida através do furo da ancoragem na torre, sendo depois fixado com uma cunha (*wedge*).



Figura 4.49 - Ponte Internacional do Guadiana. Início do içamento do tudo de revestimento

Com o tubo e o primeiro cordão fixado à torre, a extremidade inferior do primeiro cordão foi inserido no furo de ancoragem no tabuleiro, sendo depois feito o tensionamento na ancoragem inferior. Os cordões foram inseridos, um a um, no tubo com um *pusher*, que é um equipamento que empurra os cordões a partir do tabuleiro (Figura 4.50) [47-48].

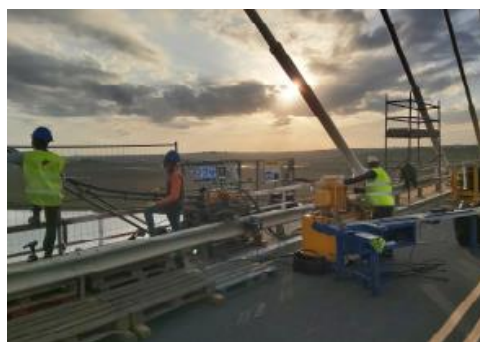


Figura 4.50 - Ponte Internacional do Guadiana. Instalação de novos cordões nos tirantes a partir do tabuleiro

O tensionamento dos cordões foi feito usando o sistema ConTen (Figura 4.51) [48]. Este sistema otimiza o processo, permitindo que cada cordão seja tensionado individualmente e com forças equivalentes em todos eles. A segunda e última fase da tensão é aplicada somente depois da instalação de todos os cordões e é feito um retensionamento global dos cabos [47-48].



Figura 4.51 - Ponte Internacional do Guadiana. Tensionamento dos cabos com o sistema ConTen

#### **4.3.4.5 Segunda fase do tensionamento dos tirantes e instalação do sistema de monitorização**

Após realizada a instalação total dos novos tirantes foi feito o retensionamento global com o objetivo de elevar o tabuleiro em 0,5 m no meio do vão central, para reduzir os momentos fletores. De seguida foram instalados os grampos de compactação e o fechamento dos tirantes, depois foram realizados os trabalhos de proteção anti-corrosão nas ancoragens. O sistema de proteção anti-corrosão utilizado é compatível com um ambiente de elevada agressividade, garantindo uma alta durabilidade [47-48].

Em relação à monitorização, foi implementado o sistema DYNA Force®sensors, que permite medir as forças em cada um dos tirantes da ponte, em qualquer momento, através de

sensores de um material elasto-magnético instalado diretamente nos cordões. A permeabilidade do aço quando exposto a um campo magnético muda conforme o acréscimo de tensão. Ao medir a mudança na permeabilidade, a tensão no tirante pode ser determinada. Foram instalados dois sensores em cada cordão, localizados na ancoragem na torre, totalizando 256 sensores, ou seja, 128 unidades em cada torre. Na Figura 4.52 mostra-se uma saída gráfica dos resultados da monitorização (no eixo das abcissas estão as datas e no eixo das ordenadas está a força nos cordões, em KN) [47-48].



Figura 4.52 - Ponte Internacional do Guadiana. Exemplo de resultados gráficos da monitorização da força nos cordões

#### 4.3.4.6 Outras intervenções realizadas

Foram realizadas outras intervenções na ponte, que incluíram a repavimentação do tabuleiro, arranjos dos passeios, guarda-corpos e guardas de segurança, reparação de elementos de betão armado, drenagem do tabuleiro, sinalização rodoviária e iluminação.

## 4.4 Algumas comparações entre as duas pontes

### 4.4.1 Notas sobre as soluções de reabilitação dos tirantes

Em relação às anomalias observadas nos sistemas de tirantes, há alguns pontos em comum nas duas pontes, embora elas tenham um funcionamento estrutural muito diferente, essencialmente associado ao espaçamento longitudinal dos tirantes.

As principais anomalias nos sistemas de tirantes das duas pontes incluem fios partidos ou com falta de tensão, deficiências na proteção anti-corrosão dos tirantes e corrosão nas ancoragens.

Como referido, a maior diferença na reabilitação dos tirantes das duas pontes prende-se com o faseamento dos trabalhos. Na ponte Edgar Cardoso será necessário instalar tirantes provisórios para dar sustentação à ponte antes de se concretizar o sistema de tirantes definitivos, ao passo que na ponte Internacional do Guadiana os tirantes puderam ir sendo progressivamente retirados e substituídos diretamente pelos tirantes definitivos.

#### **4.4.2 Modelação estrutural para apoio às intervenções nas obras**

##### **4.4.2.1 Modelos estruturais das duas pontes**

A preparação dos trabalhos de substituição de tirantes requer, sempre, a realização de análises estruturais para se avaliar o acréscimo de tensão nos tirantes quando é retirado um tirante. Estas análises permitem a definição das melhores metodologias a usar em cada caso.

A síntese de resultados que se apresenta no ponto seguinte tem por base uma análise estrutural não-linear, simulando a redistribuição de esforços associados à remoção de tirantes. As análises estruturais foram realizadas com recurso ao programa *SAP2000*, um *software* de elementos finitos, com interface gráfica 3D. Na Figura 4.53 representa-se o modelo global da ponte Edgar Cardoso (Figueira da Foz) e na Figura 4.54 representa-se o modelo global da ponte Internacional do Guadiana.

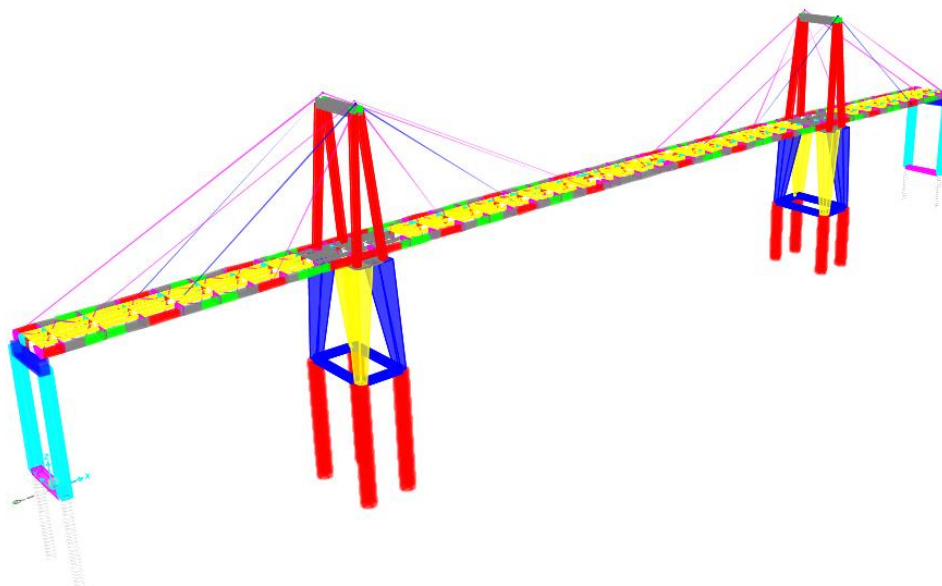


Figura 4.53 - Modelo tridimensional da ponte Edgar Cardoso (*SAP2000*)

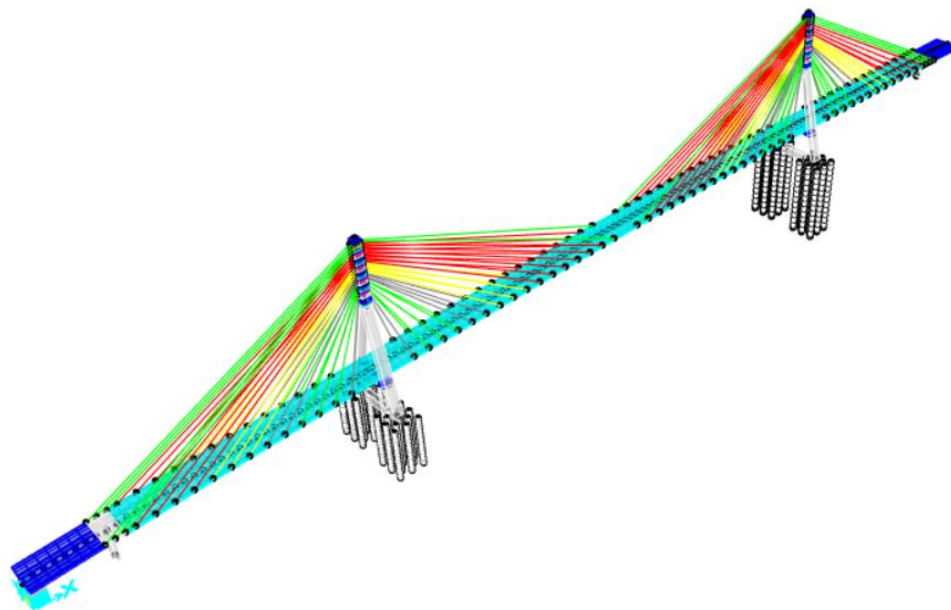


Figura 4.54 - Modelo tridimensional da ponte Internacional do Guadiana (SAP2000)

#### 4.4.2.2 Análise da remoção de tirantes nas duas pontes

Como referido, a modelação e análise estrutural do processo de remoção de tirantes foi realizada com vista a obter as variações nos esforços axiais instalados nos tirantes adjacentes ao tirante removido. Com esta finalidade, foram consideradas apenas as cargas permanentes, que incluem o peso próprio (PP) e as restantes cargas permanentes (RCP).

Na Tabela 3 e na Tabela 4 é possível observar, para a ponte Edgar Cardoso, que ao retirar um tirante, os tirantes adjacentes sofrem um acréscimo de força axial considerável. A título de exemplo, refere-se que no caso do tirante 11 partido, o crécimo nos esforços axiais no tirante adjacente pode atingir 275%. Um acréscimo desta ordem inviabiliza a retirada do tirante, pelo que obriga à colocação prévia de tirantes provisórios.

Tabela 3 - Conjunto de tirantes removidos dos vãos laterais do tabuleiro e acréscimo de força axial nos restantes tirantes da ponte Edgar Cardoso

| Tirantes   | Força Axial | TIRANTES PARTIDOS |      |         |      |         |      |
|------------|-------------|-------------------|------|---------|------|---------|------|
|            |             | T1                |      | T3      |      | T5      |      |
|            | KN          | KN                | %    | KN      | %    | KN      | %    |
| Tirante 1  | 6834,982    | 0                 |      | 8163,06 | 119% | 6905,08 | 101% |
| Tirante 2  | 6833,832    | 7788,34           | 114% | 6934,09 | 101% | 6788,59 | 99%  |
| Tirante 3  | 3991,601    | 5339,96           | 134% | 0       | 0%   | 5287,28 | 132% |
| Tirante 4  | 3991,42     | 4092,53           | 103% | 4069,39 | 102% | 3995,64 | 100% |
| Tirante 5  | 2260,559    | 2374,97           | 105% | 4539,8  | 201% | 0       | 0%   |
| Tirante 6  | 2260,811    | 2177,05           | 96%  | 2267,87 | 100% | 2272,11 | 100% |
| Tirante 7  | 2911,409    | 2606,8            | 90%  | 2864,78 | 98%  | 2904,05 | 100% |
| Tirante 8  | 2911,108    | 2929,1            | 101% | 2917,35 | 100% | 2904,87 | 100% |
| Tirante 9  | 3897,457    | 3869,4            | 99%  | 3892,41 | 100% | 3897,91 | 100% |
| Tirante 10 | 3897,461    | 3911,02           | 100% | 3899,03 | 100% | 3898,15 | 100% |
| Tirante 11 | 6913,256    | 6733,44           | 97%  | 6879,82 | 100% | 6907,2  | 100% |
| Tirante 12 | 6913,345    | 7096,97           | 103% | 6940,68 | 100% | 6913,06 | 100% |

Tabela 4 - Conjunto de tirantes removidos do vão central do tabuleiro e acréscimo de força axial nos restantes tirantes da ponte Edgar Cardoso

| Tirantes   | Força Axial | TIRANTES PARTIDOS |      |         |      |         |      |
|------------|-------------|-------------------|------|---------|------|---------|------|
|            |             | T7                |      | T9      |      | T11     |      |
|            | KN          | KN                | %    | KN      | %    | KN      | %    |
| Tirante 1  | 6834,982    | 6609,49           | 97%  | 6781,29 | 99%  | 6185,85 | 91%  |
| Tirante 2  | 6833,832    | 6846,04           | 100% | 6843,74 | 100% | 7396,7  | 108% |
| Tirante 3  | 3991,601    | 3956,64           | 99%  | 3982,45 | 100% | 3871,59 | 97%  |
| Tirante 4  | 3991,42     | 3995,96           | 100% | 3992,65 | 100% | 4076,63 | 102% |
| Tirante 5  | 2260,559    | 2251,29           | 100% | 2261,4  | 100% | 2226,71 | 99%  |
| Tirante 6  | 2260,811    | 2252,73           | 100% | 2262,33 | 100% | 2259,22 | 100% |
| Tirante 7  | 2911,409    | 0                 | 0%   | 5100,48 | 175% | 1721,43 | 59%  |
| Tirante 8  | 2911,108    | 2928,25           | 101% | 2929,45 | 101% | 2663,55 | 91%  |
| Tirante 9  | 3897,457    | 5529,93           | 142% | 0       | 0%   | 10726,6 | 275% |
| Tirante 10 | 3897,461    | 3911,17           | 100% | 3947,68 | 101% | 3728,97 | 96%  |
| Tirante 11 | 6913,256    | 6640,46           | 96%  | 9001,8  | 130% | 0       | 0%   |
| Tirante 12 | 6913,345    | 6856,52           | 99%  | 6860,54 | 99%  | 8664,53 | 125% |

No caso da ponte Internacional do Guadiana foram realizadas seis simulações numéricas, considerando a remoção de um par de tirantes longos, um par de tirantes de comprimento intermédio e um par de tirantes curtos. Verifica-se que ao retirar um par de tirantes por completo, os tirantes adjacentes não sofrem alterações significativas nos esforços axiais (Tabela 5).

Tabela 5 - Conjunto de tirantes removidos e acréscimo de força axial nos restantes tirantes da ponte Internacional do Guadiana

| Tirantes   | Força Axial<br>KN | TIRANTES PARTIDOS |      |          |      |          |      |
|------------|-------------------|-------------------|------|----------|------|----------|------|
|            |                   | T1                |      | T15      |      | T31      |      |
|            |                   | KN                | %    | KN       | %    | KN       | %    |
| Tirante 1  | 2820,214          | 0                 |      | 2871,49  | 102% | 2819,237 | 100% |
| Tirante 2  | 2820,247          | 3063,506          | 109% | 2865,561 | 102% | 2818,823 | 100% |
| Tirante 3  | 2823,278          | 3073,992          | 109% | 2879,439 | 102% | 2822,46  | 100% |
| Tirante 4  | 2823,27           | 3057,781          | 108% | 2873,077 | 102% | 2821,982 | 100% |
| Tirante 5  | 2831,33           | 3070,187          | 108% | 2894,321 | 102% | 2830,779 | 100% |
| Tirante 6  | 2831,281          | 3054,016          | 108% | 2885,818 | 102% | 2830,077 | 100% |
| Tirante 7  | 1915,679          | 2067,321          | 108% | 1964,32  | 103% | 1915,579 | 100% |
| Tirante 8  | 1915,568          | 2056,72           | 107% | 1955,511 | 102% | 1914,767 | 100% |
| Tirante 9  | 1980,283          | 2116,198          | 107% | 2044,189 | 103% | 1980,833 | 100% |
| Tirante 10 | 1980,081          | 2105,916          | 106% | 2028,194 | 102% | 1979,309 | 100% |
| Tirante 11 | 2055,911          | 2173,033          | 106% | 2139,476 | 104% | 2057,454 | 100% |
| Tirante 12 | 2055,68           | 2163,104          | 105% | 2114,693 | 103% | 2055,13  | 100% |
| Tirante 13 | 2136,199          | 2232,912          | 105% | 2242,184 | 105% | 2139,236 | 100% |
| Tirante 14 | 2135,986          | 2223,354          | 104% | 2206,451 | 103% | 2135,96  | 100% |
| Tirante 15 | 1851,376          | 1914,862          | 103% | 0        | 0%   | 1855,776 | 100% |
| Tirante 16 | 1851,251          | 1907,197          | 103% | 1916,672 | 104% | 1852,052 | 100% |
| Tirante 17 | 1907,085          | 1953,707          | 102% | 2018,085 | 106% | 1914,215 | 100% |
| Tirante 18 | 1907,038          | 1946,387          | 102% | 1977,245 | 104% | 1909,224 | 100% |
| Tirante 19 | 1944,533          | 1975,514          | 102% | 2053,458 | 106% | 1955,612 | 101% |
| Tirante 20 | 1944,582          | 1968,551          | 101% | 2013,335 | 104% | 1948,942 | 100% |
| Tirante 21 | 1575,849          | 1589,68           | 101% | 1658,092 | 105% | 1589,317 | 101% |
| Tirante 22 | 1575,982          | 1584,365          | 101% | 1626,365 | 103% | 1582,099 | 100% |
| Tirante 23 | 1541,662          | 1546,108          | 100% | 1615,063 | 105% | 1561,348 | 101% |
| Tirante 24 | 1541,895          | 1541,136          | 100% | 1584,255 | 103% | 1551,615 | 101% |
| Tirante 25 | 1272,859          | 1270,385          | 100% | 1327,673 | 104% | 1297,343 | 102% |
| Tirante 26 | 1273,148          | 1266,356          | 99%  | 1301,755 | 102% | 1285,696 | 101% |
| Tirante 27 | 1114,756          | 1108,064          | 99%  | 1158,544 | 104% | 1147,848 | 103% |
| Tirante 28 | 1115,102          | 1104,448          | 99%  | 1134,466 | 102% | 1131,874 | 102% |
| Tirante 29 | 862,468           | 854,072           | 99%  | 894,545  | 104% | 904,088  | 105% |
| Tirante 30 | 862,816           | 850,972           | 99%  | 873,379  | 101% | 882,091  | 102% |
| Tirante 31 | 592,785           | 584,575           | 99%  | 615,687  | 104% | 0        | 0%   |
| Tirante 32 | 593,092           | 581,831           | 98%  | 596,772  | 101% | 610,749  | 103% |

| Tirantes   | Força Axial<br>KN | TIRANTES PARTIDOS |      |         |      |         |      |
|------------|-------------------|-------------------|------|---------|------|---------|------|
|            |                   | T33               |      | T47     |      | T63     |      |
|            |                   | KN                | %    | KN      | %    | KN      | %    |
| Tirante 32 | 593,092           | 578,792           | 98%  | 600,718 | 101% | 583,842 | 98%  |
| Tirante 33 | 581,777           | 0                 | 0%   | 582,534 | 100% | 631,734 | 109% |
| Tirante 34 | 581,913           | 598,543           | 103% | 561,24  | 96%  | 587,193 | 101% |
| Tirante 35 | 876,374           | 917,941           | 105% | 876,88  | 100% | 943,287 | 108% |
| Tirante 36 | 876,696           | 894,917           | 102% | 853,021 | 97%  | 893,248 | 102% |
| Tirante 37 | 1161,584          | 1194,79           | 103% | 1163,63 | 100% | 1250,23 | 108% |
| Tirante 38 | 1162,024          | 1177,68           | 101% | 1136,55 | 98%  | 1193,33 | 103% |
| Tirante 39 | 1359,088          | 1383,79           | 102% | 1364,32 | 100% | 1466,93 | 108% |
| Tirante 40 | 1359,581          | 1371,01           | 101% | 1335,29 | 98%  | 1405,87 | 103% |
| Tirante 41 | 1689,445          | 1709,47           | 101% | 1700,88 | 101% | 1829,6  | 108% |
| Tirante 42 | 1690,022          | 1698,49           | 101% | 1666,54 | 99%  | 1757,39 | 104% |
| Tirante 43 | 1775,887          | 1789,78           | 101% | 1794,66 | 101% | 1927,93 | 109% |
| Tirante 44 | 1776,455          | 1781,38           | 100% | 1759,49 | 99%  | 1853,97 | 104% |
| Tirante 45 | 2256,546          | 2268,26           | 101% | 2291,12 | 102% | 2450,68 | 109% |
| Tirante 46 | 2257,214          | 2260,18           | 100% | 2246,87 | 100% | 2357,66 | 104% |
| Tirante 47 | 2278,758          | 2286,61           | 100% | 2326,8  | 102% | 0       | 0%   |
| Tirante 48 | 2279,366          | 2280,23           | 100% | 2281,94 | 100% | 2373,8  | 104% |
| Tirante 49 | 2272,84           | 2278,04           | 100% | 2336,2  | 103% | 2434,7  | 107% |
| Tirante 50 | 2273,351          | 2272,9            | 100% | 2290,75 | 101% | 2358,41 | 104% |
| Tirante 51 | 2681,116          | 2685,18           | 100% | 2776,9  | 104% | 2839,65 | 106% |
| Tirante 52 | 2681,557          | 2680,09           | 100% | 2721,81 | 102% | 2764,9  | 103% |
| Tirante 53 | 2615,827          | 2618,45           | 100% | 2732,67 | 104% | 2741,89 | 105% |
| Tirante 54 | 2616,047          | 2614,1            | 100% | 2676,73 | 102% | 2679,92 | 102% |
| Tirante 55 | 2521,505          | 2523,17           | 100% | 2659,52 | 105% | 2619,54 | 104% |
| Tirante 56 | 2521,442          | 2519,3            | 100% | 2602,6  | 103% | 2567,61 | 102% |
| Tirante 57 | 2396,641          | 2397,67           | 100% | 2554,76 | 107% | 2471,48 | 103% |
| Tirante 58 | 2396,236          | 2394,07           | 100% | 2496,74 | 104% | 2427,49 | 101% |
| Tirante 59 | 2240,655          | 2241,27           | 100% | 2416,47 | 108% | 2296,81 | 103% |
| Tirante 60 | 2239,864          | 2237,77           | 100% | 2357,24 | 105% | 2259,18 | 101% |
| Tirante 61 | 2054,416          | 2054,75           | 100% | 2244,03 | 109% | 2095,84 | 102% |
| Tirante 62 | 2053,215          | 2051,25           | 100% | 2183,49 | 106% | 2063,35 | 100% |
| Tirante 63 | 2734,944          | 2735,15           | 100% | 0       | 0%   | 2779,48 | 102% |
| Tirante 64 | 2732,56           | 2729,86           | 100% | 2936,92 | 107% | 2737,49 | 100% |

Os resultados são os esperados pois, como foi referido anteriormente, as pontes têm uma conceção muito diferente, no que respeita ao espaçamento longitudinal dos tirantes. A ponte Edgar Cardoso tem um total de 6 tirantes por torre, ao passo que a ponte Internacional do Guadiana tem um total de 64 tirantes por torre.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Contributos do trabalho realizado

As inspeções realizadas periodicamente, associadas aos resultados fornecidos pelos sistemas de monitorização, permitem identificar as anomalias existentes nas pontes, bem como a realização de uma adequada programação da conservação e da reabilitação das obras. As atividades de observação contribuem, de forma significativa, para o aumento da vida útil das estruturas, pelo que os estudos nesta área são de extrema importância no âmbito da engenharia civil.

As inspeções e a monitorização são particularmente importantes na deteção e acompanhamento de anomalias nos sistemas de tirantes de pontes, designadamente no que toca a cabos partidos ou sem tensão, à corrosão dos próprios cabos e das peças de ancoragem, etc. Os desenvolvimentos recentes na monitorização automática e nas inspeções realizadas fotografia digital e *drone* facilitam a recolha de elementos fundamentais sobre o comportamento das obras, mas as inspeções visuais tradicionais, principalmente em zonas fechadas das obras, terão de continuar a ser levadas a efeito.

A ponte Edgar Cardoso e a ponte Internacional do Guadiana são estruturas muito importantes, mas têm conceções estruturais muito diferentes. Apresentaram-se as principais anomalias verificadas nos tirantes destas pontes e as soluções de reabilitação em ambos os casos, que atenderam, naturalmente, à especificidade de cada uma das obras. Refere-se, em particular, que na ponte Internacional do Guadiana os tirantes puderam ser retirados e substituídos sem restrições de montagem, ao passo que na ponte da Figueira da Foz houve necessidade de prever a sustentação do tabuleiro através de tirantes provisórios.

O novo sistema de tirantes da ponte Internacional do Guadiana permitirá, no futuro, a substituição individualizada de cordões sem necessidade de intervenção nos restantes.

Considera-se que a presente dissertação contribuiu para a divulgação dos conhecimentos sobre a deterioração e a substituição de tirantes em pontes, enfatizando, neste campo, a importância da conceção estrutural e dos sistemas de atirantamento deste tipo de pontes.

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

Como trabalhos futuros sugere-se a realização de estudos, com modelos numéricos tri-dimensionais, para simular os efeitos decorrentes de perdas de rigidez nos tirantes no comportamento estrutural e a cinemática da substituição dos tirantes.

Também se afigura de interesse a realização de simulações numéricas para avaliação das consequências da rotura de fios ou cordões de tirantes, designadamente no que respeita ao acréscimo de força nos tirantes vizinhos, às variações dos momentos fletores nas vigas longitudinais dos tabuleiros e às variações dos deslocamentos e rotações dos pontos de ancoragem dos tirantes.

Os sistemas de monitorização dos tirantes de pontes também poderão eventualmente ser melhorados. Estes melhoramentos respeitam ao tipo de equipamentos e à sua localização, tendo em conta os cenários de colapso das obras.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] TROITSKY, M. S. (1977): Cable-Stayed Bridges. Theory and Design. Crosby Lockwood Staples, London (United Kingdom), pp. 386.
- [2] RITO, Armando; APPLETON Júlio. Inspeção e reabilitação da ponte da Figueira da Foz e dos viadutos de acesso. Comunicação consultada *online* entre Novembro de 2021 e Maio de 2022 no *site* do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. Disponível em: <https://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/Artigos/Ultimos/Figueira-repar-2000.pdf>
- [3] General Information, Project Type and Location - Edgar Cardoso Bridge. Informação técnica da ponte Edgar Cardoso consultada *online* entre Novembro de 2021 e Maio de 2022 no *site* Structurae. Disponível em: <https://structurae.net/en/structures>
- [4] BATISTA, António Lopes. Pontes de Tirantes. 2022. Aula do Mestrado em Engenharia Civil, lecionada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [5] MARTINS, Alberto Miguel Bizarro. Análise e optimização de pontes atirantadas de betão. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. 2015.
- [6] CALADO, Carlos Miguel Cabeçadas. Concepção estrutural das pontes de tirantes. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico. 2011.
- [7] HYPPOLITO, Henrique Franzener. Effect of cable damage on the structural behavior of a cable-stayed bridge. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto. 2020.
- [8] WALTHER, R. (1999): Cable-Stayed Bridges. London: Thomas Telford. London (United Kingdom).
- [9] MAZARIM, Diego Montagnini. Histórico das pontes estriadas e sua aplicação no Brasil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011.
- [10] LEONHARDT, F. Cable stayed bridges with prestressed concrete. *Journal of Prestressed Concrete Institute*. 1987;32(5):1-30.

- [11] TORNARI, Paola. Comportamento estrutural de pontes estaiadas: Comparação de alternativas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2002.
- [12] BERNARD, I.W.; MOIA, P. (1988): Cable-Stayed Bridges. Presses Polytechniques Roman-des. Lausanne (Switzerland).
- [13] CAETANO, Elsa de Sá. Dynamics of cable-stayed bridges: Experimental assessment of cable-structure interaction. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2000.
- [14] MELLIER, E. (2011): High Level Engineering for Stay Cable Replacement. Freyssinet International. Dubai (United Arab Emirates).
- [15] PINTO, Gonçalo. Estudo do dano e da substituição dos tirantes numa ponte atirantada. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2020.
- [16] CARVALHO, Gonçalo Valente Cardoso Dias. Modelação do viaduto do Corgo durante o ensaio de carga estático. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2015.
- [17] SANTOS, Carolina Almeida Novaes. Structural optimization of cable-stayed bridges considering the action of permanent and transitory loads. Dissertação de Doutoramento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2019.
- [18] BILLINGTON, D.P.; NAZMY, A. History and aesthetics of cable-stayed bridges. *ASCE Library*.
- [19] Marques LNMV. Monitorização Estática e Dinâmica: Aplicações. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade do Minho*. 2007.
- [20] SILVEIRA, Paulo; OLIVEIRA, Pedro. Sistema de monitorização estrutural da ponte do freixo. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 419/2018, Proc. 0304/12120869 - Núcleo de Observação Estrutural, Departamento de Estruturas. 2018.

- [21] RODRIGUES, Carlos Filipe Guedes. Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra óptica. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2011.
- [22] JOAQUIM, Ana Rita da Silva. Ensaios dinâmicos de caracterização da força axial em cabos pré-tensionados. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 2017.
- [23] CAETANO, E.; CUNHA, A. Dynamic testing of cable structures. 6th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. MATEC Web of Conferences. 2015;24:1-15.
- [24] DALLY, J.W. (1993): Instrumentation for Engineering Measurements. John Wiley & Sons. New York (United States of America).
- [25] MOREIRA, Pedro Manuel Barbosa. Sistema de Supervisão e Controlo em Instrumentação Distribuída. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2011.
- [26] FERREIRA, Manuel Lourenço Rosa. Guia Técnico: Volume 6 - Guia para o diagnóstico de equipamentos de obras de arte. Infraestruturas de Portugal. 2014.
- [27] ALMEIDA, Daniel Peixoto. Representação tridimensional de pontes com recurso a robôs móveis de superfície. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2018.
- [28] LE, T.; GIBB, S.; PHAM N.; LA H.M.; FALK L.; BERENDSEN T. Autonomous robotic system using non-destructive evaluation methods for bridge deck inspection. *In* Robotics and Automation, IEEE International Conference. 2017;3672–3677.
- [29] SILVEIRA, Paulo. Especificações técnicas complementares para a inspeção principal da ponte Edgar Cardoso. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 277/2015, Proc. 0304/121/17079 - Núcleo de Observação Estrutural, Departamento de Estruturas. 2015.
- [30] SILVA, Filipe Moura. Inspeção de obras de arte especiais: Pontes e viadutos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2016.

- [31] SANCHES, Emily Cunha; Min, Shu. Relatório de inspeção da ponte Edgar Cardoso. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Núcleo de Observação Estrutural, Departamento de Estruturas. 2020.
- [32] DAWE, P. (2003): Research Perspectives: Traffic Loading on Highway Bridges. London: Thomas Telford. London (United Kingdom).
- [33] ALVES, Manuel Pedro. Modelação de sobrecargas rodoviárias: Estudo comparativo entre diferentes normas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2012.
- [34] SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R.G. (2005): Mechanical Engineering Design. Bookman. Michigan (United States of America).
- [35] SOUZA, Eric Douglas. Análise do Efeito da Tensão Média Sobre a Resistência à Fadiga do Aço ASTM A743 CA6NM. Projecto de Graduação 2 do Grau de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. 2011.
- [36] OLIVEIRA, Pedro; COELHO, Tiago; SILVEIRA, Paulo. Relatório de Inspeção da ponte internacional sobre o rio Guadiana. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 229/2017, Proc. 0304/121/20869 - Núcleo de Observação Estrutural, Departamento de Estruturas. 2017.
- [37] GOMES, Luís Miguel Lousas Carrilho. Excitação paramétrica em tirantes de pontes. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2006.
- [38] CORREIA, M.J.; SALTA, M.M.; BAPTISTA, A.M.. Corrosão sob tensão em ancoragens. *Corrosão e Protecção de Materiais*. 2014;33(1-2):5-11.
- [39] ZUCOLOTTI, Fernando Destefanni. Introdução à abrasão-corrosão: Uma Revisão. Monografia do Grau de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo. 2016.
- [40] Standard practice for presentation of constant amplitude fatigue test results for metallic materials. *American Society for Testing and Materials*. 2018;E468-18.

- [41] RITO, Armando; APPLETON, Júlio. Rehabilitation of the Figueira da Foz Bridge. *Structural Engineering International*. 2005;15(2):9.
- [42] RITO, Armando; CABRAL, Pedro, XAVIER, Luís, ABECASSIS, Tiago. Betão estrutural: O projecto de substituição dos tirantes da ponte Edgar Cardoso. *Construção Magazine*. 2020;99.
- [43] SILVEIRA, Paulo. Caracterização do sistema de monitorização estrutural da ponte Edgar Cardoso. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 379/2020, Proc. 0304/121/22165 - Núcleo de Observação Estrutural, Departamento de Estruturas. 2020.
- [44] RITO, Armando; CABRAL, Pedro; ABECASSIS, Tiago. Light touch on history. *Structural Elements and Protection*. 2021;103:54-55.
- [45] RITO, Armando; CABRAL, Pedro, XAVIER, Luís; ABECASSIS, Tiago. O Projecto de substituição dos tirantes da ponte Edgar Cardoso. *Congresso Nacional do Laboratório Nacional de Engenharia Civil*. 2021.
- [46] SILVEIRA, Paulo. Automatização do sistema de monitorização da ponte internacional sobre o rio Guadiana. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Proc. 304/1/17125, Nota Técnica 17/2010 - Núcleo de Observação Estrutural, Departamento de Estruturas. 2010.
- [47] MARTÍNEZ Fernando.; ABECASSIS, Duarte. Guadiana international bridge new generation stay cables. DYWIDAG. 2021.
- [48] ABECASSIS, Duarte; GRUSKE-WEIBENBACH, Nils. Stay smart. *Structural Elements and Protection*. 2020;99:6



