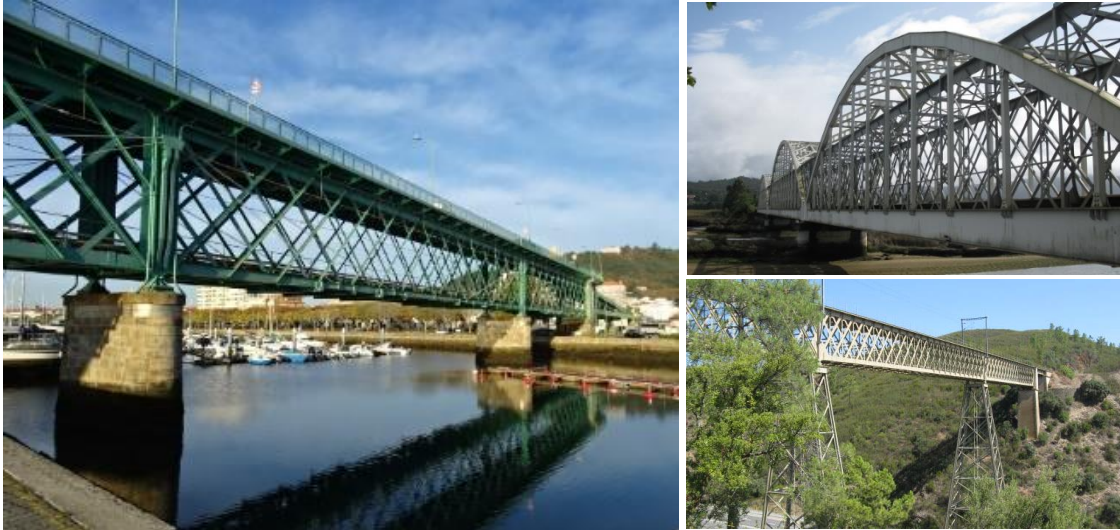




Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Área Departamental de Engenharia Civil



Inspeção e Manutenção de Pontes Ferroviárias em Estrutura Metálica

ANDREIA FILIPA MARQUES LOPES

(Licenciada em Engenharia Civil)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Área de Especialização de Estruturas

Orientador:

Doutor Paulo Jorge Henriques Mendes

Júri:

Presidente: Doutor Paulo José de Matos Martins

Vogais:

Doutor Luís Miguel Pina de Oliveira Santos

Doutor Paulo Jorge Henriques Mendes

Novembro 2018

“Sometimes it is the people who no one imagines anything of who do the things that no one can imagine.”

— Alan Turing

Agradecimentos

A realização da presente dissertação de mestrado contou com importantes apoios aos quais estarei eternamente grata.

Ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Mendes agradeço a sua disponibilidade, motivação, confiança, conhecimentos transmitidos ao longo deste trabalho e por me inculcir o conceito de melhoria constante. Agradeço também ao ISEL e a todos os professores que me acompanharam ao longo destes anos de formação, pelos importantes contributos para a minha formação pessoal, técnica e científica.

À Infraestruturas de Portugal SA., pela autorização para consulta e utilização de elementos cruciais à elaboração desta dissertação. Em especial ao Eng.º Luís Freire e à Eng.ª Fernanda Santos por toda a sua disponibilidade, apoio e interesse demonstrados ao longo da realização deste trabalho. A toda a equipa de Inspeção e Diagnóstico de Estruturas Especiais – Pontes, por todo o carinho com que me acolheram e integraram, pelos conhecimentos transmitidos e por me fazerem sentir como um verdadeiro membro da equipa, em especial ao Jorge Santos e ao Paulo Valbom. O meu sincero obrigada ao Eng.º Nuno Lopes, por todo o inestimável conhecimento transmitido, pela disponibilidade, pela confiança depositada e sobretudo, pela paciência ao longo do meu percurso profissional. À Eng.ª Teresa Maia, por me ter acolhido desde o primeiro dia de estágio, pela partilha de conhecimento ao longo dos últimos meses, pela ajuda e interesse demonstrados ao longo deste trabalho e sobretudo pelos deliciosos figos e mirtilos. Ao Eng.º Sérgio Pereira e à Eng.ª Patrícia Faria, pela partilha de conhecimento, pelo incentivo e motivação transmitidos, um grande obrigada.

Aos meus amigos de sempre, Joana, Rute, Ana, Alves, Lourenço, Gonçalo e Garrido, por terem acompanhado de perto esta fase do meu percurso académico, pelo incansável apoio e paciência, em especial ao Tiago, com quem partilhei esta etapa e à Inês, minha amiga de todas as horas. Ao Marcos, o meu mais profundo e especial agradecimento, pela pessoa maravilhosa que é, pelo constante apoio, incentivo e carinho e por ser sempre o revisor mais crítico de tudo o que faço. És absolutamente indispensável em todas as etapas.

Aos meus pais, Justina e Paulo, à minha irmã Ana e aos meus avós, Manuel e Leocádia, por me demonstrarem o verdadeiro significado de força e vontade de viver, por me ensinarem a ser um pouco melhor a cada dia e sobretudo por todo o amor e carinho que me têm proporcionado ao longo da vida.

Resumo

Ao longo da vida das Obras de Arte, o seu comportamento deve ser alvo de atenção contínua, por forma a detetar possíveis anomalias que possam pôr em causa a segurança estrutural ou o nível de desempenho.

Com o presente trabalho pretende-se demonstrar a importância da realização de inspeções, para o caso específico de pontes ferroviárias de estrutura metálica, tendo em vista a identificação dos principais mecanismos de degradação, evidenciando as várias anomalias que usualmente são identificadas neste tipo de estruturas.

Numa primeira fase, descrevem-se os principais sistemas de gestão de pontes, mostrando-se o panorama a nível internacional e em Portugal, procurando evidenciar a importância deste tipo de ferramenta de apoio à decisão, no que respeita às necessidades de intervenção neste tipo de estruturas.

A realização de inspeções, permite um conhecimento aprofundado da condição estrutural das Obras de Arte, permitindo uma priorização das necessidades de intervenção e conseqüentemente, a correta implementação das intervenções a realizar nas Obras de Arte. Podendo-se assim, repor os padrões aceitáveis de desempenho e garantir a sua integridade estrutural.

Neste contexto, identificam-se e descrevem-se os principais danos encontrados em pontes ferroviárias de estrutura metálica, efetuando uma correlação de fatores como a idade, a tipologia, o material constituinte, o meio em que se inserem, entre outros.

O trabalho termina com a apresentação do estudo de caso de uma ponte ferroviária, em estrutura metálica, que apresenta diversas anomalias, sendo um dos propósitos deste trabalho a análise e interpretação das mesmas e a apresentação de propostas de intervenção e reabilitação.

Para o referido estudo, contribuíram as campanhas de inspeção da Infraestruturas de Portugal realizadas durante o ano de 2018, com o objetivo de avaliar o estado de conservação da Obra de Arte.

Abstract

Throughout the service life of bridges, their behavior must be continuously monitored in order to detect possible damages that could jeopardize structural safety or performance. The present study demonstrates the importance of conducting inspections, in the specific case of railway bridges with metallic structure, in order to identify the main mechanisms of degradation, evidencing the various anomalies triggered.

At the beginning of the work, the main bridge management systems are described, particularizing to the reality in the United States and Portugal, trying to expose the importance of this tool to support the decision, regarding the intervention needs of the structures.

Periodic inspections permit a correct evaluation of the structural condition of bridges, allowing a prioritization of the needs and consequently, the correct implementation of the interventions to be performed. This way, acceptable performance standards are restored and structural integrity is guaranteed.

In this context, the main damages found in railway bridges with metallic structure are identified and described, correlating with factors such as age, type, materials used, environment in which they are inserted, among others.

The main goal of this work is the presentation of a case study, specifically of a railway bridge in metallic structure. The bridge was selected with the care of being a very complete example of anomalies, and some proposals for intervention and rehabilitation are also presented. For this study, contributed to the inspections campaigns of Infraestruturas de Portugal carried out during the year 2018, in order to evaluate the state of conservation of the bridge.

Palavras Chave / Keywords

Sistemas de gestão de obras de arte / Bridge management system

Pontes ferroviárias / Railway bridge

Ciclo de vida útil / Life cycle

Inspeção visual / Visual inspection

Monitorização ferroviária / Railway monitoring

Metodologias de manutenção / Maintenance methodologies

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do texto.....	3
2	GESTÃO DE PONTES	5
2.1	Considerações iniciais	5
2.2	Tipologias e sistemas estruturais comuns.....	6
2.2.1	Pontes em viga	7
2.2.2	Pontes em arco.....	8
2.2.3	Pontes de cabos.....	8
2.3	Principais componentes das pontes ferroviárias.....	9
2.3.1	Obra de Arte	11
2.3.2	Muros de suporte.....	11
2.3.3	Taludes.....	12
2.3.4	Encontros	13
2.3.5	Aparelhos de apoio	14
2.3.6	Pilares	16
2.3.7	Tabuleiro.....	16
2.3.8	Estrutura de suporte ao tabuleiro	17
2.3.9	Via	18
2.3.10	Murete guarda balastro.....	23
2.3.11	Passeios.....	23
2.3.12	Guarda corpos.....	24
2.3.13	Drenagem.....	24
2.3.14	Juntas de dilatação	25
2.3.15	Proteção de superfície	25
2.3.16	Outros componentes.....	26
2.4	Ciclo de vida das Obras de Arte	26
2.5	Sistemas de gestão de Obras de Arte.....	27
2.5.1	Sistemas de gestão de Obras de Arte – A realidade Europeia	28
2.5.2	Sistemas de gestão de Obras de Arte – A realidade Americana	29

2.5.3	Sistema de gestão de Obras de Arte em Portugal	30
2.6	Considerações finais.....	39
3	PRINCIPAIS ANOMALIAS EM PONTES FERROVIÁRIAS DE ESTRUTURA METÁLICA	41
3.1	Considerações iniciais	41
3.2	Fenómenos associados à degradação de estruturas metálicas	41
3.2.1	Corrosão	42
3.2.2	Fadiga	47
3.2.3	Rotura frágil.....	49
3.2.4	Encurvadura.....	50
3.2.5	Sobrecargas ferroviárias.....	50
3.3	Principais anomalias por componente.....	52
3.3.1	Anomalias no tabuleiro e na estrutura de suporte ao tabuleiro.....	52
3.3.2	Anomalias nos aparelhos de apoio.....	54
3.3.3	Anomalias nos guarda corpos e passeios.....	57
3.4	Considerações finais.....	59
4	INSPEÇÃO, ENSAIOS E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PONTES FERROVIÁRIAS	61
4.1	Considerações iniciais	61
4.2	Técnicas de inspeção e diagnóstico de estruturas	62
4.2.1	Inspeção visual	62
4.2.2	Zonas inacessíveis para inspeção.....	64
4.2.3	Ensaio não destrutivo	64
4.3	Monitorização da integridade estrutural.....	66
4.3.1	Conceito de monitorização da integridade estrutural – “Structural health monitoring”	67
4.3.2	Ensaio dinâmico	67
4.3.3	Monitorização estrutural ao longo das várias fases das Obras de Arte.....	70
4.3.4	Monitorização de pontes ferroviárias em Portugal e no mundo.....	71
4.3.5	Componentes de um sistema de monitorização estrutural	76
4.4	Estratégias de reparação e reforço de estruturas metálicas	77
4.4.1	Aumento da capacidade de carga	79
4.4.2	Adição de perfis comerciais ou novas chapas.....	81
4.4.3	Reforço e substituição de elementos	81
4.4.4	Substituição de ligações.....	82

4.4.5	Redução de vibrações	82
4.4.6	Proteção de superfície.....	83
4.5	Considerações finais.....	83
5	ESTUDO DE CASO	85
6	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS	87
6.1	Principais conclusões	87
6.2	Perspetivas de desenvolvimentos futuros	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		91

Simbologia

Abreviaturas

AC	Aparelho carrilador
AD	Aparelho de dilatação
AMV	Aparelho de mudança de via
ATO	Aparelho de atravessamento oblíquo
ATR	Aparelho de atravessamento retangular
COM	Aparelho de comunicação ou “S” de ligação
CP	Caminhos de Ferro Portugueses
IA	Índice de avaria
IET	Instrução de exploração técnica
IP	Infraestruturas de Portugal
PH	Passagem hidráulica
PI	Passagem inferior
PIP	Passagem inferior pedonal
Pk	Ponto quilométrico
PO	Ponte
PS	Passagem superior
PSP	Passagem superior pedonal
REFER	Rede Ferroviária Nacional
TJD	Aparelho transversal de junção dupla
TJS	Aparelho transversal de junção simples
UIC	<i>International Union of Railways</i>
VU	Viaduto

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A conservação e manutenção de obras de arte tem vindo a despertar uma crescente preocupação não só em Portugal, mas em todo o mundo. O aumento da circulação de pessoas, e o envelhecimento de pontes em serviço são os principais motivos do crescente interesse nesta área.

As obras de arte, nomeadamente as pontes ferroviárias, apresentam uma elevada importância para a sociedade e para o funcionamento da economia de um país. A interdição de uma ponte ferroviária tem impacto no funcionamento de toda a rede ferroviária na qual se encontra inserida, podendo daí resultar um elevado impacto socio económico a todos os seus utentes. Atendendo que Portugal é um país com um vasto e diversificado património de obras de arte, associadas à rede ferroviária, existe uma elevada necessidade em assegurar o seu funcionamento sem interdições.

A rede ferroviária nacional contempla um património de obras de arte, com diversos sistemas estruturais e materiais constituintes, tais como betão armado, alvenaria, estrutura metálica e mista, num total de 2358. Particularizando para o caso das pontes em estrutura metálica, que serão objeto de estudo neste trabalho, a rede contempla 547, sendo que algumas delas apresentam um elevado valor histórico e simbólico.

Na Figura 1.1 mostram-se algumas pontes metálicas inseridas na rede ferroviária nacional.

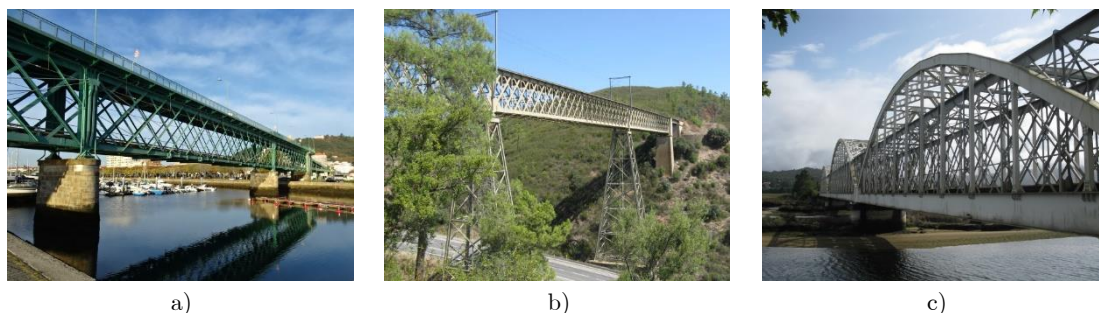


Figura 1.1 - Pontes ferroviárias em estrutura metálica: a) Linha do Minho, Ponte do Lima (1878), b) Linha da Beira Baixa, Ponte de S. Pedro (1889) e c) Linha do Minho, Ponte do Coura (1879).

No que respeita às pontes ferroviárias, sabe-se que estas se encontram sujeitas a diversas ações que desencadeiam processos de deterioração, quer sejam as solicitações devidas às elevadas cargas a que estão sujeitas ou a exposição a diferentes temperaturas e condições climatéricas.

Aliando estes factos à reduzida atenção dada em projeto à durabilidade destas obras, em benefício de um menor custo inicial de construção, reúnem-se todas as condições para um aumento dos gastos na conservação e reabilitação da estrutura.

Nesse sentido, o recurso à implementação de Sistemas de Gestão de Obras de Arte é fundamental, por forma a otimizar as decisões de intervenção estrutural, garantido assim um nível de segurança compatível com a utilização das infraestruturas.

Estes sistemas devem conter um conjunto de informação, recolhida em inspeções e eventuais ensaios que retratem o seu estado de conservação, de maneira que o gestor destas obras tenha uma ferramenta de trabalho adequada para tomar as melhores decisões, priorizando a intervenção nas obras de arte que possuam uma condição estrutural mais grave, repondo os padrões de desempenho e de garantia da integridade estrutural.

Neste contexto, devem ser realizadas inspeções periódicas às pontes em serviço, detetando possíveis anomalias, através de inspeções visuais, ensaios não destrutivos ou semi-destrutivos, levantamentos topográficos e hidrográficos, campanhas de nivelamento ou ainda inspeções subaquáticas, permitindo assim a manutenção correta destas estruturas (Lopes, 2012).

1.2 Objetivos

Com o presente trabalho pretende-se mostrar uma perspetiva sobre a gestão de inspeções e manutenção de pontes ferroviárias, aplicado ao caso de pontes ferroviárias metálicas.

Por forma a atingir este objetivo, é necessário realizar um conjunto de objetivos intermédios, os quais se enunciam de seguida:

- Abordar a temática relativa ao Sistema de Gestão de Obras de Arte, europeu, americano e particularizando para o caso português;
- Identificar os principais tipos de obras de arte existentes na rede ferroviária nacional;

- Caracterizar os principais sistemas estruturais de pontes ferroviárias em estrutura metálica;
- Descrever e identificar as principais anomalias identificadas em pontes ferroviárias de estrutura metálica, assim como as suas causas;
- Caracterizar os vários tipos de inspeção, assim como os ensaios não destrutivos de diagnóstico para avaliação do estado de degradação das estruturas metálicas;
- Aplicar os conceitos anteriormente descritos na análise a um caso prático, sendo escolhida uma ponte ferroviária com treliça metálica.

1.3 Organização do texto

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos, incluindo o presente capítulo de introdução e o capítulo das conclusões e perspectivas futuras. Apresenta-se, de seguida, um breve resumo de cada capítulo.

Capítulo 2 – Gestão de pontes

Neste capítulo descrevem-se as diferentes tipologias e sistemas estruturais mais comuns, bem como os principais componentes das pontes ferroviárias. Refere-se a importância da implementação de sistemas de gestão de Obras de Arte, apresentando alguns sistemas utilizados na Europa, nos Estados Unidos da América e o sistema existente em Portugal, evidenciando-se a necessidade da existência de um inventário rigoroso das Obras de Arte, assim como um histórico de relatórios de inspeção, por forma a auxiliar o gestor de infraestruturas na tomada de decisões.

Capítulo 3 – Principais anomalias em pontes ferroviárias de estrutura metálica

Este capítulo é dedicado ao estudo das principais anomalias que afetam as pontes de estrutura metálica, dando especial atenção ao tabuleiro, estrutura de suporte ao tabuleiro, aparelhos de apoio, guarda corpos e passeios. Para além da descrição das anomalias, são ainda apresentadas as principais causas do seu aparecimento.

Capítulo 4 – Inspeção, ensaios e avaliação do comportamento estrutural de pontes ferroviárias

Este capítulo tem como finalidade retratar a importância da inspeção e diagnóstico como ferramenta de apoio à decisão final de intervenção da estrutura e abordam-se alguns dos ensaios não destrutivos, que permitem aferir o estado de degradação da estrutura. É ainda abordado o tema relativo à monitorização da integridade estrutural, ao longo das diversas fases da vida de uma Obra de Arte, apresentando exemplos reais de pontes ferroviárias em Portugal que possuem ou já possuíram em alguma fase, sistemas de monitorização. Neste capítulo também se apresentam algumas estratégias de reparação e reforço de estruturas metálicas.

Capítulo 5 – Estudo de caso

Neste capítulo efetua-se o estudo de caso de uma ponte ferroviária em estrutura metálica, envolvendo a recolha de dados sobre a construção, geometria e sistema estrutural, os detalhes da inspeção visual por elementos e da inspeção subaquática, assim como as anomalias identificadas. Este capítulo envolve também a atribuição de índices de avaria dos componentes, assim como algumas propostas de medidas de atuação.

Capítulo 6 – Conclusões e perspetivas futuras

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas na realização do trabalho, assim como propostas para desenvolvimentos futuros.

2 Gestão de pontes

2.1 Considerações iniciais

O conceito de Obra de Arte aplica-se a todas as estruturas que possuam pelo menos um vão livre igual ou superior a 2m. Caso o vão seja inferior a 2m, designa-se por Aqueduto (Órgão de Drenagem de via) ou Galeria Técnica, consoante a finalidade (IP, 2017).

Desde o início dos tempos que existe a necessidade de traspor obstáculos, tais como rios. Até finais do século XVIII, as pontes eram maioritariamente construídas em alvenaria ou madeira, evoluindo para materiais como aço e ferro fundido, devido à revolução industrial.

Com a utilização de materiais de construção com melhores propriedades, como betão armado, aço e compósitos, o desempenho mecânico das estruturas tem vindo a melhorar significativamente.

A evolução que se tem verificado com o passar do tempo, é refletida com um aumento da construção de Obras de Arte. No entanto, o ritmo de crescimento do número de Obras de Arte e o controlo de custos e prazos para a sua construção, tem originado um decréscimo em parâmetros como a qualidade e a durabilidade das estruturas.

Grande parte das estruturas das obras de arte encontram-se deterioradas devido, à idade avançada que apresentam, às condições ambientais a que estão sujeitas, por vezes agressivas, e ao aumento do volume de tráfego.

Atendendo à importância e custos envolvidos, por forma a manter um bom funcionamento das pontes, é necessário gerir a sua manutenção, recorrendo à implementação de sistemas de gestão informáticos, que permitam auxiliar no levantamento e priorização das necessidades de intervenção, constituindo uma importante ferramenta de apoio à decisão (Santiago, 2000).

Assim, neste capítulo começa-se por introduzir as principais tipologias e os sistemas estruturais mais utilizados em pontes ferroviárias, descrevendo-se numa fase subsequente as suas principais componentes.

Posteriormente apresenta-se uma perspetiva sobre o ciclo de vida das obras de arte, descrevendo-se alguns dos principais conceitos associados.

Finalmente, apresentam-se alguns sistemas de gestão de Obras de Arte, evidenciando-se no panorama Europeu, os sistemas de gestão existentes em França, na Suíça e na Dinamarca e ao nível dos E.U.A., apresentam-se apenas os sistemas mais utilizados (PONTIS e BRIDGIT), terminando com a descrição da realidade Portuguesa.

2.2 Tipologias e sistemas estruturais comuns

As tipologias e sistemas estruturais adotadas na construção de pontes têm sido usualmente condicionados pelos materiais e tecnologias existentes aquando da sua construção, bem como, pelos recursos económicos disponíveis.

A escolha da tipologia é em grande parte condicionada pelo comportamento estrutural e pelo meio em que será inserida, por forma a fundir-se de uma forma harmoniosa com a paisagem.

De entre a variedade de sistemas estruturais existentes, podem ser distinguidos três grandes grupos, sendo eles as pontes em viga, as pontes de cabos e as pontes em arco, representadas na Figura 2.1.

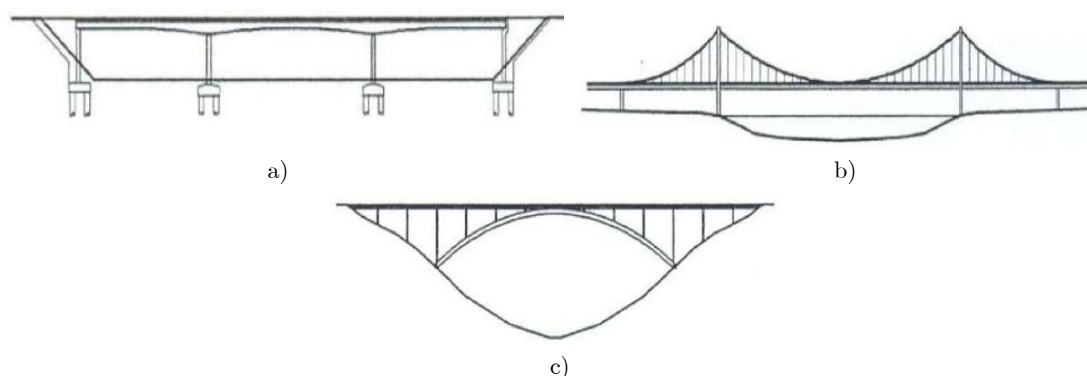


Figura 2.1 – Sistemas estruturais mais comuns em pontes ferroviárias: a) Pontes em viga, b) Pontes de cabos e c) Pontes em arco (adaptado de [Manterola & Cruz, 2004]).

2.2.1 Pontes em viga

As pontes em viga, representam o sistema estrutural mais comum em pontes metálicas antigas, por possuir um processo construtivo mais simplificado relativamente às pontes em arco ou às pontes de cabos.

Geralmente, este tipo de pontes sustenta-se em dois encontros extremos e em pilares intermédios, no caso de se tratar de uma estrutura com vãos múltiplos, ou apenas em dois encontros extremos, no caso de um vão simplesmente apoiado. Do ponto de vista resistente, os esforços transversais, tais como momento fletor e esforço transversal, são os esforços predominantes entre os apoios.

Existem diferentes tipos de pontes em viga, nomeadamente, a viga simplesmente apoiada (Figura 2.2), a viga em treliça (Figura 2.3) e a viga contínua (pórtico) (Figura 2.4).



Figura 2.2 - Exemplo de uma ponte em viga simplesmente apoiada: Linha da Beira Baixa, Ponte da Presa.



Figura 2.3 – Exemplo de uma ponte em viga em treliça: Linha da Beira Baixa, Ponte do Tejo.



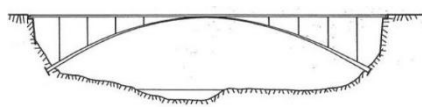
Figura 2.4 - Exemplo de uma ponte em viga contínua (pórtico): Linha de Sintra, Travessa de S. Domingos de Benfica.

2.2.2 Pontes em arco

As estruturas em arco permitem vencer grandes vãos. Devido à sua forma curvilínea desenvolvida segundo a linha de pressões, funcionam essencialmente à compressão (C. Costa, 2009), sendo por isso, o tipo estrutural mais apropriado para alvenaria de pedra, dado o seu bom comportamento quando sujeito a compressões. O arco é muitas vezes utilizado como estrutura de suporte ao tabuleiro.

Do ponto de vista estrutural, as cargas são transmitidas às fundações através do arco, por compressão axial.

Dentro das pontes em arco, existem ainda duas categorias: pontes em arco com tabuleiro superior (Figura 2.5) e pontes em arco com tabuleiro inferior (Figura 2.6).

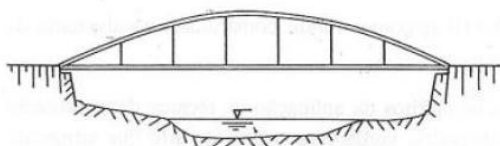


a)



b)

Figura 2.5 - Exemplo de uma ponte em arco com tabuleiro superior: a) Sistema estrutural (adaptado de [Reis, 1997]) e b) Ramal de Viseu, Ponte do Pego.



a)



b)

Figura 2.6 - Exemplo de uma ponte em arco com tabuleiro inferior: a) Sistema estrutural (adaptado de [Reis, 1997]) e b) Linha do Sul, Variante de alcácer, Ponte do Sado.

2.2.3 Pontes de cabos

Neste tipo de pontes, os cabos funcionam essencialmente à tração e servem de suporte ao tabuleiro, que trabalha à flexão. É possível distinguir dois tipos de pontes: as pontes suspensas e as pontes atirantadas.

Nas pontes suspensas, os cabos são a principal estrutura de suporte, permitindo suspender o tabuleiro através de ancoragens e pontos de fixação intermédios, tal como se observa na Figura 2.7.

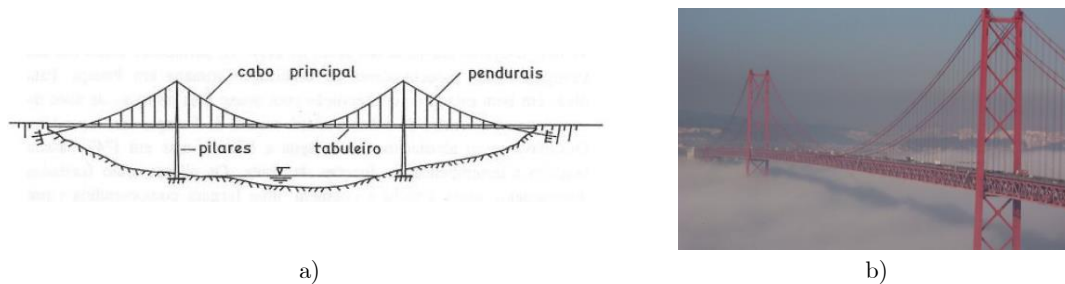


Figura 2.7 - Exemplo de uma ponte suspensa: a) Sistema estrutural (adaptado de [Reis, 1997]) e b) Linha do Sul, Ponte 25 de Abril.

Nas pontes atirantadas, o tabuleiro fica suspenso através de cabos inclinados e fixos em torres, tal como representado na Figura 2.8.

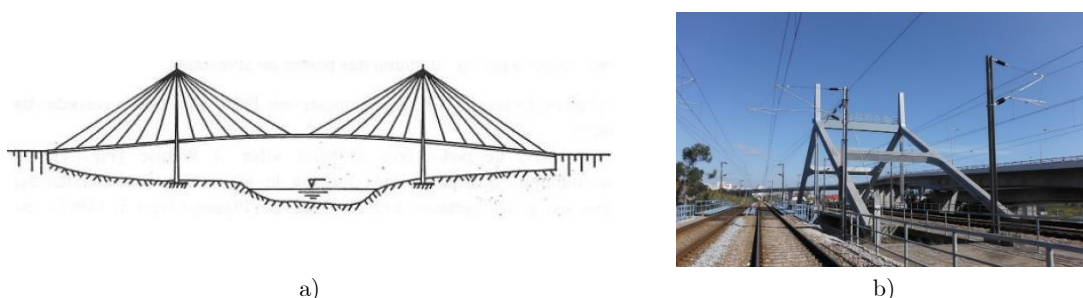


Figura 2.8 - Exemplo de uma ponte atirantada: a) Sistema estrutural (adaptado de [Reis, 1997]) e b) Linha do Norte, Ponte de Sacavém.

2.3 Principais componentes das pontes ferroviárias

A estrutura de uma ponte pode ser decomposta em três partes: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura. A superestrutura representa a parte superior, isto é, a parte que tem contacto direto com as cargas associadas ao tráfego ferroviário. Os componentes que se inserem neste grupo são, o tabuleiro, as juntas de dilatação, o guarda corpos e os componentes da via (balastro, travessas e carris). A mesoestrutura refere-se à parte intermédia que transmite os esforços da superestrutura à infraestrutura. Os componentes que se inserem neste grupo são, os pilares, os encontros e os aparelhos de apoio. Finalmente, a infraestrutura trata-se da fundação da Obra de Arte. As fundações são definidas de acordo com as cargas envolvidas e pelo terreno existente (Marchetti, 2008).

A Figura 2.9 pretende ilustrar os principais componentes que constituem as pontes.

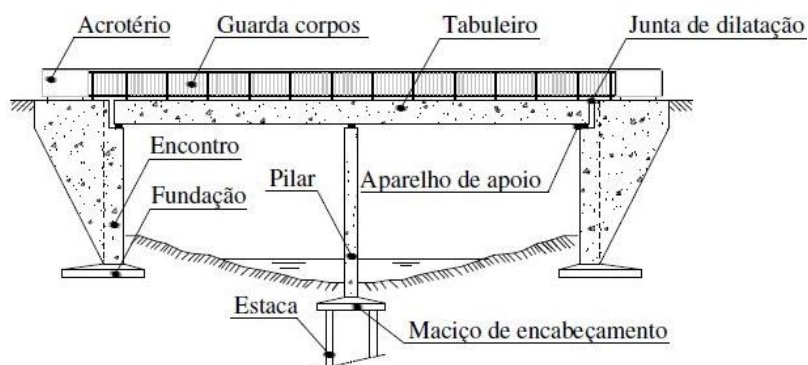


Figura 2.9 - Principais componentes das pontes (adaptado de [V. Costa, 2009]).

Numa perspetiva mais direcionada para inspeção, conservação e manutenção das obras de arte pertencentes à Infraestruturas de Portugal, os componentes das pontes podem ser classificados em 16 tipos distintos, conforme se apresenta na Tabela 2.1. De referir que esta classificação é adotada para todos os tipos de pontes, quer sejam de betão, alvenaria ou metálicas.

Tabela 2.1 – Componentes das Obras de Arte.

Número	Componente
1	Obra de Arte
2	Muros de suporte
3	Taludes
4	Encontros
5	Aparelhos de apoio
6	Pilares
7	Tabuleiro
8	Estrutura de suporte ao tabuleiro
9	Via
10	Murete guarda balastro
11	Passeios
12	Guarda corpos
13	Drenagem
14	Juntas de dilatação
15	Proteção de superfície
16	Outros componentes

De seguida, apresenta-se uma descrição detalhada dos principais componentes acima referidos.

2.3.1 *Obra de Arte*

O componente Obra de Arte reflete o estado de conservação geral da estrutura, com base nos vários estados de conservação dos seus componentes.

2.3.2 *Muros de suporte*

Os muros de suporte podem dividir-se em dois grupos, consoante se trate de um elemento de suporte de terras adjacente aos encontros e tabuleiro, ou de um elemento de contenção associado ao tabuleiro para suporte do material de enchimento, sendo este último tipo mais comum em pontes de alvenaria.

Os elementos de suporte de terras adjacentes à Obra de Arte, podem ser monolíticos com a mesma, ou separados através de juntas de dilatação. Assim, dentro deste tipo existem:

- Muros de ala;
- Muros de avenida,
- Muros de contenção.

Os muros de ala, são paralelos à via, formando um certo ângulo, tipicamente superior a 15° , com a mesma. Este elemento pode ser independente ou não dos encontros, e tem uma influência direta no comportamento global da Obra de Arte (Figura 2.10a). Os muros de avenida são paralelos à via e podem ser independentes dos encontros, influenciando diretamente o comportamento global da Obra de Arte (Figura 2.10b).



a)



b)

Figura 2.10 – Muros de contenção: a) Muro de ala e b) Muro de avenida.

Os muros de contenção, referem-se aos muros que não se incluem em nenhuma das categorias anteriores, devido ao seu formato, ou função. Geralmente, são independentes

dos encontros, não tendo influência direta no comportamento global da Obra de Arte, suportando taludes. Um exemplo deste tipo de muros trata-se dos muros de gabião, cuja principal aplicação é a contenção de taludes, particularmente, muros de suporte e espera. A Figura 2.11 mostra uma vista geral deste tipo de muros.



Figura 2.11 - Muro de contenção.

Os muros de suporte associados ao tabuleiro têm por função conter os esforços horizontais e sobrecargas. Estes elementos, designam-se por muros tímpano e têm como principal função confinar o material de enchimento e conter os esforços horizontais provocados por impulsos de terras e sobrecargas na direção transversal à via. Na Figura 2.12 encontram-se representados alguns exemplos deste tipo de muros.



a)



b)

Figura 2.12 - Exemplos de muro tímpano: a) Muro tímpano sobre arcos e pilares e b) Muro tímpano sobre o arco.

2.3.3 Taludes

Os taludes classificam-se em função do seu material de revestimento. Assim sendo, podem evidenciar-se os taludes vegetais ou não vegetais, consoante o solo seja tratado ou não tratado. A estabilidade deste componente é, por sua vez, fundamental para garantir a estabilidade da Obra de Arte.

Posto isto, podem definir-se taludes vegetais, como sendo taludes naturais, ou seja, não sofreram qualquer tipo de tratamento ou manutenção, a não ser ações de limpeza da

superfície e desmatação (Figura 2.13). Por vezes, este tipo de taludes apresenta crescimento de vegetação de grande porte, cujas raízes são responsáveis pelo aparecimento de fissuras nos componentes principais.



Figura 2.13 - Talude vegetal.

Considera-se um talude não vegetal, sempre que exista um revestimento superficial destinado a conferir proteção e resistência ao talude, um certo grau de impermeabilização, ou alguma harmonia estética com o meio envolvente (Figura 2.14).



Figura 2.14 - Talude não vegetal.

2.3.4 *Encontros*

Os encontros estabelecem a transição entre a Obra de Arte e a via de comunicação que lhe dá acesso, através de um aterro. Este componente tem como principal função suportar as cargas verticais e horizontais transmitidas pela superestrutura, transmitindo-as, por sua vez, à infraestrutura e aos aterros confinantes. Possuem um papel determinante no comportamento global da Obra de Arte, pois permitem que a estrutura suporte o tabuleiro e os seus deslocamentos e, se necessário, os aterros confinantes.

O tipo de encontro adotado depende muito das condições topográficas existentes no local, podendo distinguir-se dois tipos de encontro consoante a sua acessibilidade ao local, o encontro aparente e o encontro perdido.

O encontro aparente (Figura 2.15), também conhecido por encontro tipo cofre, é constituído por um muro de testa e dois muros laterais, os quais podem ser perpendiculares ou inclinados relativamente ao muro de testa. Tal como já referido, caso o muro seja perpendicular toma o nome de muro de avenida, caso seja inclinado designa-se por muro de ala. Estes casos encontram-se ilustrados na Figura 2.16.

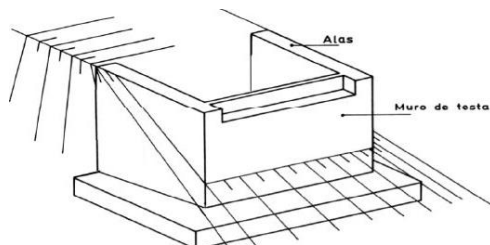


Figura 2.15 - Encontro aparente (adaptado de [Reis, 1997]).



Figura 2.16 - Encontros: a) Com muro de avenida e b) Com muro de ala (adaptado de [Reis, 1997]).

O encontro perdido (Figura 2.17), torna-se mais económico, por ser um prolongamento da superestrutura e conservar o ângulo do talude natural, limitando-se o encontro a um simples apoio para a extremidade do tabuleiro, sem que este tenha a função de suportar o aterro (Reis, 1997).

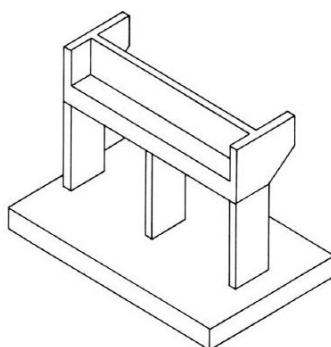


Figura 2.17 - Encontro perdido (adaptado de [Reis, 1997]).

2.3.5 Aparelhos de apoio

Os aparelhos de apoio em Obras de Arte são elementos de ligação, que permitem efetuar a transição de forças entre a superestrutura e a infraestrutura, libertando movimentos

relativos entre as duas partes, segundo condições de operacionalidade, segurança e durabilidade (Freire, 2008).

A utilização de aparelhos de apoio pretende criar uma descontinuidade entre a superestrutura e a infraestrutura, por forma a interromper a transmissão de forças dinâmicas e vibrações que possam instabilizar a Obra de Arte. Além de permitirem movimentos de translação e rotação, devem ainda garantir que as deformações que ocorrem na superestrutura não geram forças e movimentos de grande amplitude na mesoestrutura.

De acordo com os graus de liberdade que restringem, os aparelhos de apoio podem ser designados por fixos ou móveis, sendo estes últimos classificados em unidireccionais (uma translação) ou multidireccionais (várias translações). Na Tabela 2.2 encontram-se representados alguns exemplos dos aparelhos de apoio mais utilizados em pontes.

Tabela 2.2 – Tipos de aparelhos de apoio.

Aparelhos Fixos			
			
Balancero fixo, com rótula de rolo	Balancero fixo, com rótula	Placas, fixo, face plana	Panela (<i>Pot Bearing</i>)
Aparelhos Móveis			
			
Rolos circulares, com rótula	Rolos circulares	Rolos seccionados, com rótula	Rolos seccionados
			
Placas, unidirecional, face plana	Panela (<i>Pot Bearing</i>), unidirecional	Rolo cilíndrico	Elastómero, unidirecional

2.3.6 Pilares

Os pilares têm como principal função receber as cargas provenientes da superestrutura e transmiti-las à infraestrutura. A geometria da secção transversal pode variar de acordo com as ações a que a estrutura se encontra submetida e com a topografia local. Relativamente ao tipo de fuste, este pode ser simples (Figura 2.18) ou múltiplo (Figura 2.19), consoante o alinhamento seja constituído por um, ou vários pilares.

No que respeita ao tipo de ligação ao tabuleiro, podem ser classificados como monolíticos ou rotulados, dependendo de vários fatores, tais como, altura e rigidez do pilar, esbelteza e distância ao centro de rigidez da Obra de Arte, viés e curvatura do tabuleiro, etc.



Figura 2.18 - Fuste simples: a) Esquema representativo (adaptado de [Reis, 1997]) e b) Linha de Cintura, Passagem Superior da Avenida Carlos Pinhão, ao Pk 008+403.

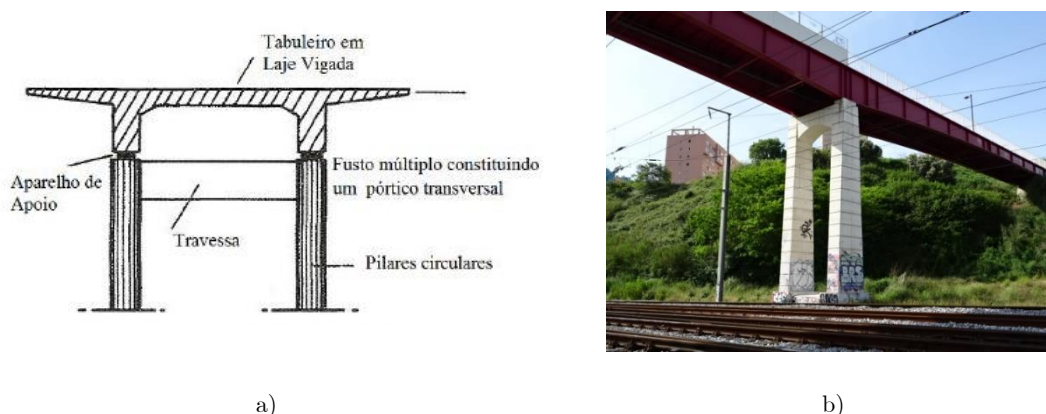


Figura 2.19 - Fuste múltiplo: Esquema representativo (adaptado de [Reis, 1997]) e b) Linha de Cintura, Passagem Superior Pedonal, ao Pk 007+945.

2.3.7 Tabuleiro

De acordo com o sistema estrutural, a largura ou o material constituinte do tabuleiro pode apresentar diferentes classificações. Alguns exemplos de classificação do sistema

estrutural, para o caso particular das estruturas metálicas, tais como, viga sob carril, vigas gêmeas e longarina-carlinga, encontram-se representados na Figura 2.20.

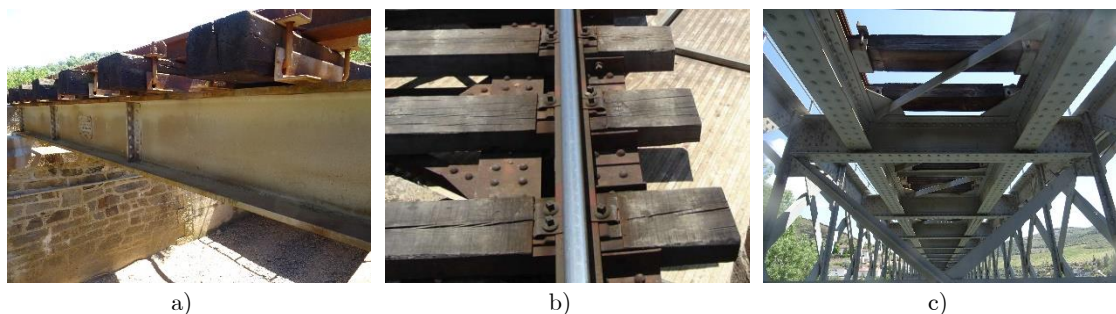


Figura 2.20 - Tabuleiro: a) Viga sob carril, b) Vigas gêmeas e c) Longarina-Carlinga.

Durante a fase de serviço, o tabuleiro é solicitado por diferentes cargas, quer sejam no sentido vertical (peso próprio, restantes cargas permanentes e sobrecargas), ou no sentido horizontal (frenagem, vento e sismos). Ações como variação de temperatura, retração ou pré-esforço, também induzem deformações na Obra de Arte (V. Costa, 2009).

O tabuleiro é o componente que suporta diretamente a estrutura da via, e correspondentes sobrecargas ferroviárias.

2.3.8 Estrutura de suporte ao tabuleiro

A estrutura de suporte ao tabuleiro, tal como o nome indica, garante o suporte necessário ao tabuleiro e aplica-se essencialmente a estruturas metálicas. Desempenha um papel especialmente importante, pois é sobre ela que descarregam as ações atuantes sobre o tabuleiro.

Nalgumas Obras de Arte, existe uma estrutura que suporta diretamente a via (tabuleiro), mas que não é autoportante, necessitando a Obra de Arte de uma estrutura principal de suporte.

O estado de conservação deste componente afeta o nível de segurança estrutural da ponte e a rotura de um dos seus elementos representa um risco para a estabilidade global da ponte.

Na Figura 2.21 encontram-se representados os sistemas estruturais mais comuns para este componente.

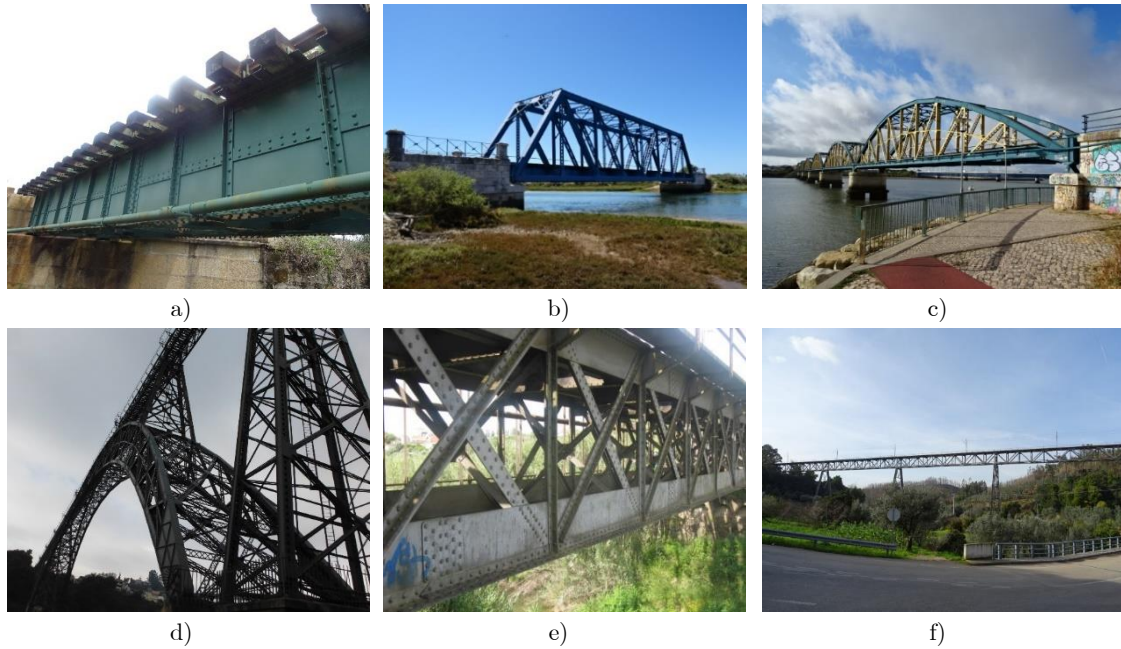


Figura 2.21 - Estrutura de suporte ao tabuleiro: a) Viga de alma cheia, b) Viga Pratt (N) Reta, c) Viga Pratt (N) Parabólica, d) Viga em arco, e) Viga Cruz de Santo André e f) Viga Warren Reta.

As diferentes configurações conduzem, naturalmente, a diferentes distribuições de esforços pelos elementos. Posto isto, tomando como exemplo a viga em Cruz de Santo André e comparando com as estruturas que apresentam uma grelha de diagonais a formar o contraventamento vertical longitudinal ao longo das vigas, verifica-se que no caso da viga em Cruz de Santo André, a secção transversal dos montantes é bastante inferior à secção das diagonais.

2.3.9 Via

No caso específico das pontes ferroviárias, a via é essencialmente constituída por balastro, travessas, carris, material de fixação e ligação. É possível distinguir duas partes essenciais, a superestrutura, formada pelos carris, travessas, balastro, material de fixação e de ligação e a infraestrutura, formada pela plataforma, aterros, trincheiras e as Obras de Arte que se destinem a suportar a via. Na Figura 2.22 encontra-se representada uma esquematização da via.

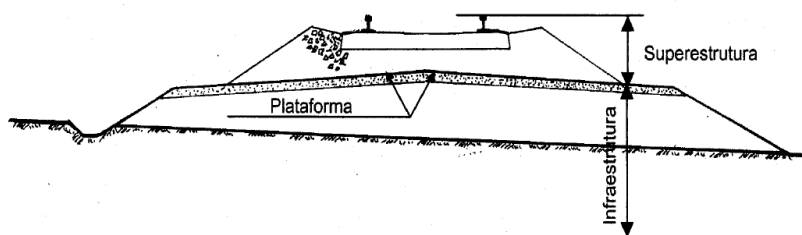


Figura 2.22 – Superestrutura e infraestrutura da via (adaptado de [REFER, 2009]).

A plataforma representa a superfície sobre a qual assenta o balastro, isto é, a base que sustenta a superestrutura e as cargas correspondentes ao tráfego ferroviário. Por forma a cumprir a sua função, deve ser plana com uma certa inclinação transversal por forma a permitir drenar as águas da chuva. Na Figura 2.23 encontra-se representado um esquema com a configuração da plataforma da via.

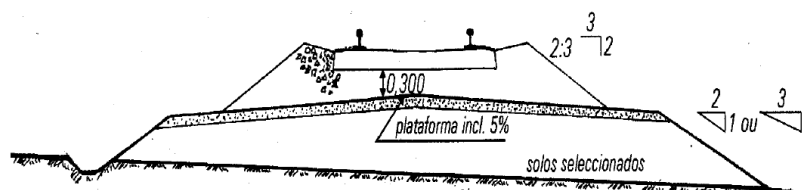


Figura 2.23 – Configuração da plataforma da via (adaptado de [REFER, 2009]).

O sistema ferroviário resulta da interação entre a via férrea e o material que nela circula, tornando-se imperativo que todos os elementos assegurem corretamente a sua função.

Conforme já referido, a superestrutura é constituída por vários elementos, como carris, travessas, balastro, material de fixação e de ligação.

Começando pelas travessas, sabe-se que estas têm como principais funções receber os esforços produzidos pelas solicitações estáticas e dinâmicas, transmitindo-as ao balastro. São ainda responsáveis pelo suporte do sistema de fixação dos carris, impedir movimentos verticais, laterais ou longitudinais dos mesmos e preservar a bitola e a inclinação do carril. No que respeita ao seu material, as travessas podem ser de madeira, betão ou metálicas.

As travessas de madeira, representadas na Figura 2.24, foram as primeiras a ser aplicadas ao longo dos tempos. Desvantagens como baixa durabilidade, elevados custos de manutenção e renovação da via têm vindo a contribuir para o decréscimo da utilização deste tipo de travessas, tendo surgido como alternativas as travessas de betão e metálicas.



Figura 2.24 – Travessas de madeira.

Apesar possuírem elevada elasticidade, boa resistência ao deslizamento sobre o balastro, peso reduzido e simples processo de fabrico, as travessas de madeira não garantem uma eficaz fixação dos carris (REFER, 2009).

As travessas de betão são as mais utilizadas atualmente, por apresentarem elevada longevidade e assegurarem uma boa fixação dos carris e estabilidade da via. Podem distinguir-se dois tipos de travessas de betão, sendo elas, monobloco de betão pré-esforçado e bi-bloco de betão armado, tal como ilustrado na Figura 2.25.



Figura 2.25 - Travessas de betão: a) Monobloco e b) Bi-bloco.

As travessas metálicas, tornaram-se pouco viáveis devido às desvantagens que apresentam, como o difícil posicionamento na via (horizontal e verticalmente), exigem isolamento elétrico especial, são ruidosas, de difícil conservação e suscetíveis a ataques químicos (Fortunato, 2005). Por estes motivos, são muito pouco utilizadas hoje em dia.

Os carris consistem em perfis de aço que sustentam e guiam o material circulante ao longo do seu trajeto, com uma secção transversal própria e caracterizam-se pelo seu peso por metro linear. Os mais usuais são:

- 60 Kg/m – linhas de tráfego pesado e linhas de alta velocidade;
- 54 Kg/m – linhas correntes;
- 45 Kg/m – linhas de tráfego leve.

Este elemento, tem como principal função transmitir aos elementos subjacentes, os esforços provenientes das ações verticais, transversais e longitudinais, assim como esforços de origem térmica.

Conforme ilustrado na Figura 2.26, um carril é composto pela face de rolamento, cabeça, alma e patilha.

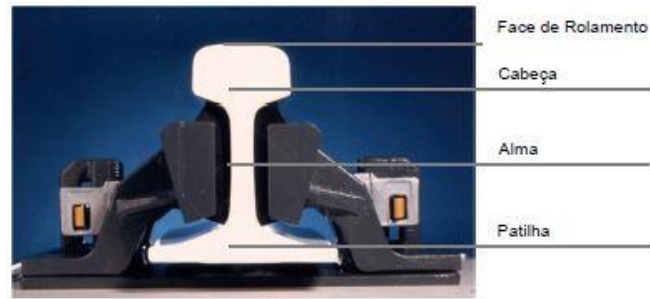


Figura 2.26 – Carril *Vignole* (adaptado de [Paixão & Fortunato, 2009]).

O carril representado trata-se do carril *Vignole*, sendo este o tipo de carril instalado na maioria das redes ferroviárias europeias.

Devido às necessidades de transporte atuais, com grandes quantidades de carga e altas velocidades, houve um aumento de exigência no que respeita ao sistema de fixação das travessas ao carril. Atualmente, ainda é muito comum encontrar sistemas de fixação antigos instalados na via. Estes sistemas caracterizam-se por terem uma fixação rígida (Figura 2.27), sem utilização de material elástico, não garantido o aperto permanente do carril, permitindo, conseqüentemente, o deslocamento longitudinal do mesmo, comumente designado por “caminhamento dos carris”.



Figura 2.27 - Fixação de carril rígida.

O sistema de fixação elástica (Figura 2.28), possui uma palmilha em material plástico sob o carril e grampos de aço, com várias configurações conforme o sistema que assegure o aperto permanente do carril.

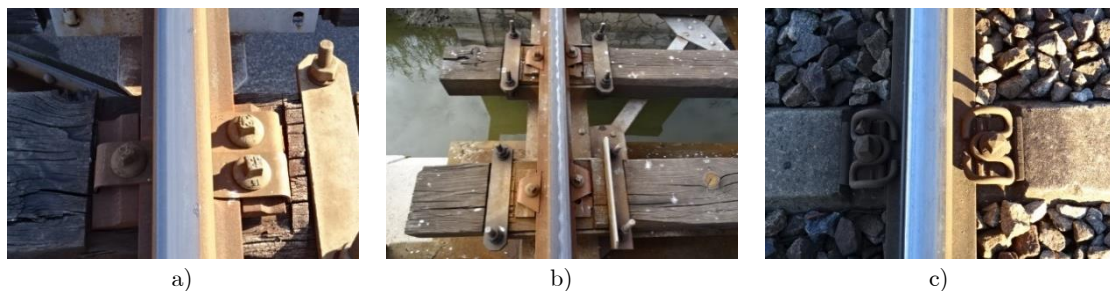


Figura 2.28 - Fixação de carril elástica: a) Chapim metálico e garra RN, b) Chapim metálico e garra Nabla e c) Fixação Vossloh.

Associados à via, podem ainda existir dispositivos especiais designados por aparelhos de via. Estes aparelhos destinam-se a garantir o bom funcionamento da via, sendo os mais frequentes:

- Aparelhos de mudança de via (AMV), em via simples ou dupla;
- Aparelho de atravessamento oblíquo (ATO);
- Aparelho de atravessamento retangular (ATR);
- Aparelho transversal de junção simples (TJS);
- Aparelho transversal de junção dupla (TJD);
- Aparelho de comunicação ou “S” de ligação (COM);
- Aparelho de comunicação dupla ou *bretelle*;
- *Charriot*;
- Placa giratória;
- Aparelhos de dilatação (AD);
- Aparelhos carrilhadores (AC).

Na Figura 2.29 encontram-se representados alguns dos aparelhos acima referidos.

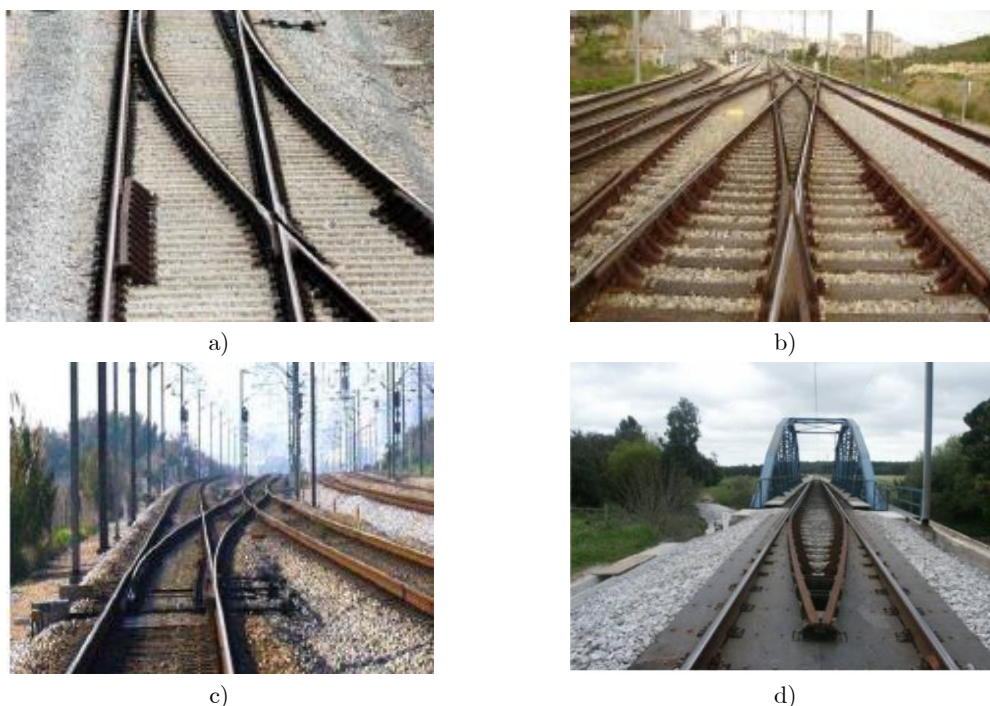


Figura 2.29 - Tipos de aparelhos de via: a) aparelho de mudança de via (AMV), b) Aparelho de atravessamento oblíquo (ATO), c) Aparelho de comunicação ou “S” de ligação (COM) e d) Aparelho carrilador (AC) (REFER, 2009).

2.3.10 Murete guarda balastro

O murete guarda balastro, tem como principal função garantir que o balastro se mantém dentro dos limites da via, assim como evitar que o mesmo entra em contacto com a Obra de Arte.

Estes muretes podem ser de alvenaria, madeira ou betão armado, no que respeita ao tipo de material constituinte e paralelos ou transversais, no que respeita à posição na via, tal como representado na Figura 2.30.



Figura 2.30 – Tipos de murete guarda balastro: a) Transversal à via, de madeira (Travessa guarda balastro); b) Paralelo à via, de betão armado e c) Transversal à via, de betão armado.

2.3.11 Passeios

Os passeios destinam-se a facilitar a circulação de pessoas ao longo da via durante campanhas de inspeção e manutenção. Podem classificar-se em interiores ou exteriores, consoante estejam localizados sobre o corpo principal da ponte, ou sobre consolas, tal como representado na Figura 2.31.



Figura 2.31 - Tipos de passeios em pontes ferroviárias: a) Passeio de visita interior e b) Passeio exterior.

2.3.12 Guarda corpos

Os guarda corpos funcionam como barreira de segurança, por forma a evitar a queda de pessoas. Este elemento, pode ser pré-fabricado, ou executado em obra. Dependendo da opção preconizada pelo projetista, podem ser constituídos pelo mesmo material da estrutura principal da ponte, ou por um material distinto, tal como representado na Figura 2.32.



Figura 2.32 - Tipos de guarda corpos em pontes ferroviárias: a) Guarda corpos fabricados em obra e b) Guarda corpos metálico pré-fabricado.

A presença de passeios e guarda corpos é fundamental para garantir a segurança dos inspetores, aquando a realizações de inspeções ou em ações de manutenção. A sua existência deverá ser sempre garantida, pelo menos, de um dos lados das estruturas, no entanto, existem casos em que tal não se verifica, sendo necessário propor a sua construção a curto prazo.

2.3.13 Drenagem

Os órgãos de drenagem têm como principal função recolher e encaminhar as águas superficiais para um sistema de drenagem geral. A má execução dos órgãos de drenagem, ou falta de manutenção pode comprometer a durabilidade das estruturas (V. Costa, 2009).

Na Figura 2.33 ilustram-se alguns exemplos de órgãos de drenagem existentes em pontes ferroviárias.



a)



b)

Figura 2.33 - Exemplos de órgãos de drenagem existentes em pontes ferroviárias: a) Bueiro e b) Caleira (meia cana).

2.3.14 Juntas de dilatação

As juntas de dilatação são dispositivos deformáveis que permitem assegurar a transição entre os elementos da ponte e as zonas fixas dos seus acessos, concedendo a existência de movimentos relativos, em condições de segurança e durabilidade.

Normalmente, localizam-se entre o tabuleiro da ponte e os encontros, no entanto, no caso de pontes muito extensas, podem situar-se na própria ponte. No último caso referido, as vigas principais têm que ser interrompidas criando-se apoios móveis por forma a permitir a dilatação na zona da junta (Reis, 1997). As juntas de dilatação são os elementos mais sujeitos a desgaste e mais sensíveis, sendo de extrema importância a garantia do seu bom funcionamento. A sua classificação pode ser efetuada tendo em consideração o modo de execução, os materiais utilizados, os movimentos permitidos, etc.

2.3.15 Proteção de superfície

A proteção de superfície apresenta maior importância no caso de estruturas metálicas, em que a pintura funciona como camada protetora da corrosão. Salienta-se a importância do estado de conservação da proteção de superfície, pois o processo corrosivo representa enormes perdas económicas, comprometendo a durabilidade e desempenho dos metais nas estruturas metálicas. A Figura 2.34 mostra o exemplo de uma proteção de superfície em perfeitas condições.



Figura 2.34 – Proteção de superfície em perfeitas condições.

2.3.16 Outros componentes

Incluem-se nesta categoria todos os componentes existentes na Obra de Arte, que não desempenhem função estrutural específica, tais como, catenária, serviços externos, meios especiais de acesso, iluminação, sinalização de tráfego, etc. Na Figura 2.35 mostram-se alguns destes componentes.

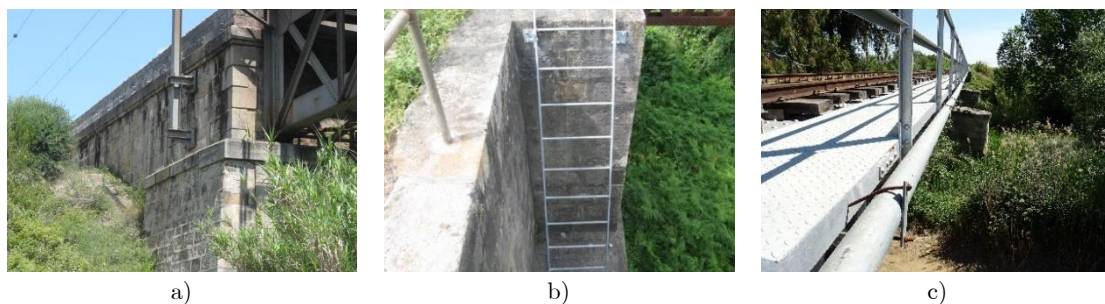


Figura 2.35 - Exemplos de Outros Componentes existentes nas pontes ferroviárias: a) Poste de Catenária, b) Escadas de acesso e c) Serviços de entidades externas.

2.4 Ciclo de vida das Obras de Arte

Todas as obras de engenharia devem garantir as condições de estabilidade e durabilidade, durante um período previamente estabelecido, denominado por vida útil. O ciclo de vida pode dividir-se em algumas fases fundamentais, sendo elas, fase de planeamento, conceção, construção, manutenção, reparação e demolição.

A duração da vida útil de uma estrutura depende não só da deterioração dos materiais que a constituem, mas também da obsolescência funcional. Caso não ocorram problemas de degradação estrutural significativos, a vida útil de uma obra termina quando os benefícios da sua exploração forem inferiores aos custos funcionais, de construção e manutenção (Brito & Branco, 1994).

Na fase de conceção, deve ser definida qual a vida útil que se pretende que a estrutura venha a atingir. Esta deve corresponder ao período temporal entre o fim da construção e

a altura em que a obra atinge um estado limite de degradação. Pontes correntes, geralmente são concebidas para durar entre 50 a 60 anos, enquanto pontes estrategicamente importantes são concebidas para durar entre 100 e 120 anos.

Durante a fase de construção, é fundamental garantir a qualidade da execução, respeitando todas as disposições de projeto e materiais escolhidos, sendo fundamental o papel da fiscalização no controlo de toda a execução, alertando para possíveis problemas que possam surgir e no esclarecimento de dúvidas sobre o projeto (A. Costa, 2003).

Durante a fase de serviço, devem ser mantidas as condições necessárias para que a estrutura tenha um bom desempenho, para tal, torna-se vital recorrer a um sistema de gestão de Obras de Arte que permita definir inspeções periódicas assim como as devidas ações de manutenção da estrutura.

A estimativa do fim da vida útil baseada na deterioração dos materiais constituintes da obra, deve ser analisada na fase de projeto. Por exemplo, para o caso das pontes ferroviárias, a obsolescência está essencialmente associada a restrições no volume de tráfego permitido, ou limitação da carga máxima. Assim, podem ser definidas logo de início, medidas que permitam atrasar a referida obsolescência e incrementar a durabilidade e funcionalidade da Obra de Arte.

2.5 Sistemas de gestão de Obras de Arte

Atualmente, é imprescindível investir na manutenção, conservação e reabilitação das Obras de Arte, promovendo o seu bom funcionamento. Para tal, é necessário recorrer a sistemas de gestão de Obras de Arte. Estes sistemas consistem numa base de dados que compila informação sobre o projeto, todas as inspeções e intervenções nas Obras de Arte. Este processo permite organizar e compreender o comportamento das estruturas, pois contém toda a informação referente a reparações, acidentes, ensaios ou monitorizações.

Através deste tipo de sistemas, é possível identificar as principais patologias e a necessidade de intervenção nas Obras de Arte, permitindo assim estimar o custo de manutenção, conservação ou reabilitação.

Do que respeita a investigação no domínio dos sistemas de gestão de Obras de Arte, importa destacar o trabalho de (Palmelão, 1989), por ter sido a primeira abordagem globalizante a um sistema de gestão de Obras de Arte com aplicação em Portugal. A importância do tema, tem vindo a despertar interesse crescente, salientando-se os trabalhos de Jorge Brito e Fernando Branco sob a forma de diversos artigos em congressos

e seminários, em Portugal, ou no estrangeiro, dos quais se destacam as referências (Brito & Branco, 1990 e Brito & Branco, 1992).

Apresenta-se agora uma perspetiva sobre os principais Sistemas de Gestão de Obras de Arte existentes na Europa e nos E.U.A, evidenciando-se a realidade Portuguesa.

2.5.1 Sistemas de gestão de Obras de Arte – A realidade Europeia

2.5.1.1 França

A gestão de pontes em França é efetuada pelo Departamento de Estradas do Ministério dos Transportes francês (D.R.C.R – M.T.). Em 1979, foi publicado um documento denominado “Normas Técnicas para a Vigilância e Manutenção das Obras de Arte” (Calgaro & Lacroix, 1997).

O documento encontra-se organizado por fascículos e para cada tipo de estrutura, como pontes de alvenaria, pontes de betão armado, pontes de betão pré-esforçado, pontes metálicas, etc., foi preparado um fascículo com regras particulares tendo em consideração as características individuais de cada obra de arte inspecionada (Brito, 1992).

2.5.1.2 Suíça

O sistema de gestão de pontes existente na Suíça, é denominado por KUBA-MS. Este sistema faz uma análise com vista à minimização dos custos de ciclo de vida, baseando-se em catálogos técnicos com diferentes tipos de intervenção e modelos de previsão de degradação dos vários elementos constituintes das pontes (Schläfli, Hajdin, & Grob, 2000).

2.5.1.3 Dinamarca

O sistema de gestão existente na Dinamarca, designado por DANBRO, foi desenvolvido por iniciativa dos Caminhos-de-ferro da Dinamarca. Segundo as referências (Sørensen & Berthelsen, 1990) e (Sørensen & Davidsen, n.d.), o sistema tem como principais objetivos garantir a segurança e funcionalidade da rede, recolher informação objetiva sobre as Obras de Arte, otimizar a utilização dos fundos disponíveis e garantir um apoio técnico-económico à entidade gestora.

2.5.2 *Sistemas de gestão de Obras de Arte – A realidade Americana*

Durante as últimas décadas, as Obras de Arte têm vindo a demonstrar sinais de deterioração acentuada e, por vezes, precoce. Estudos revelam que uma Obra de Arte nos E.U.A. é substituída em média, quando atinge 70 anos de vida, e necessita de reabilitação pelo menos uma vez durante a fase de vida útil (Ahlskog, 1988).

Nos E.U.A a gestão das pontes é efetuada pelas entidades proprietárias das mesmas, e supervisionada pela administração federal. Em 1991, foi decretado pela *Intermodal Surface Transportation Act* (ISTEA), a implementação de um sistema de gestão de pontes em cada Estado. Atualmente, estão disponíveis três tipos de sistemas sendo eles: PONTIS, BRIDGIT e um sistema de gestão próprio desenvolvido pelos Estados de Alabama, Indiana, Nova Iorque, Carolina do Norte e Pensilvânia.

2.5.2.1 PONTIS

O PONTIS foi desenvolvido nos E.U.A. e está incorporado na *AASHTOWARE program*, da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Este sistema, permite ao utilizador incluir regras específicas da política da sua instituição, definindo níveis de prioridade. Através da sua base de dados completa, permite gerir a informação relativa à inventariação de inspeção de estruturas. Pelo facto de se basear em modelos matemáticos, como as Matrizes lógicas de Markov, permite prever condições futuras e recomendar trabalhos de intervenção.

O PONTIS, atualmente designado por *AASHTOWare™ Bridge Management software*, encontra-se vocacionado para grandes conjuntos de pontes. O programa, considera uma análise da rede para a ponte e em cada ponte, faz uma análise com base nos seus elementos, tentando otimizar o processo através da realização de uma análise custo-benefício (Gutkowski & Arenella, 1998).

2.5.2.2 BRIDGIT

O BRIDGIT foi desenvolvido nos Estados Unidos da América, nas décadas de 80 e 90, pela *Delcan, Inc.* com a colaboração da *National Engineering Technology Corporation*, no âmbito do NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*).

No que respeita a funcionalidades, este programa é bastante semelhante ao PONTIS. A grande diferença reside no facto deste programa permitir analisar cada ponte individualmente, independentemente do seu nível de importância. Além disto, o

BRIDGIT possibilita a subdivisão das pontes em qualquer número de elementos, permitindo até considerar separadamente os seus elementos e os sistemas de proteção associados a estes (Hawk & Small, 1998).

2.5.3 Sistema de gestão de Obras de Arte em Portugal

Atualmente, a construção, manutenção, inspeção, reabilitação e reforço estrutural de pontes ferroviárias já existentes na rede ferroviária nacional encontra-se ao cuidado da empresa Infraestruturas de Portugal, SA (IP, SA). Esta empresa pública resulta da fusão entre a Rede Ferroviária Nacional – REFER, E.P.E. (REFER, E.P.E.) e a EP – Estradas de Portugal, SA (EP, SA). Criada pelo Decreto-Lei n.º 91/2015 de 29 de maio, reporta à Secretaria de Estado dos Transportes, no organograma oficial do Estado.

A Infraestruturas de Portugal assegura soluções integradas para avaliação das Obras de Arte, com o intuito de conhecer o estado real das estruturas, detetando anomalias e procurando identificar as causas associadas. Neste contexto, são realizadas campanhas de inspeção ao serviço ferroviário, recorrendo ao reconhecimento visual para deteção de anomalias, ensaios não destrutivos, levantamentos topográficos e hidrográficos e inspeções subaquáticas, o que permite uma intervenção racional e adequada a cada tipo de Obra de Arte.

O sistema de gestão de Obras de Arte mais utilizado pelas entidades portuguesas responsáveis pela gestão das Obras de Arte é o software GOA. Este sistema foi desenvolvido pela Betar Consultores, Lda. e encontra-se implementado nas seguintes entidades e concessionárias:

- Infraestruturas de Portugal, S.A.;
- Brisa;
- Vialitoral;
- Aenor;
- LusoScut – Beiras Litoral e Alta;
- Câmaras Municipais de Lisboa e Viseu;
- Auto-estradas do Atlântico;
- Viaexpresso;
- LusoScut – Costa de Prata,
- Scutvias.

De seguida, apresenta-se uma descrição do sistema GOA WEB aplicado especificamente a pontes ferroviárias, no que respeita a inventário, inspeção e manutenção das Obras de Arte. Na Figura 2.36 é possível observar a interface do GOA WEB.

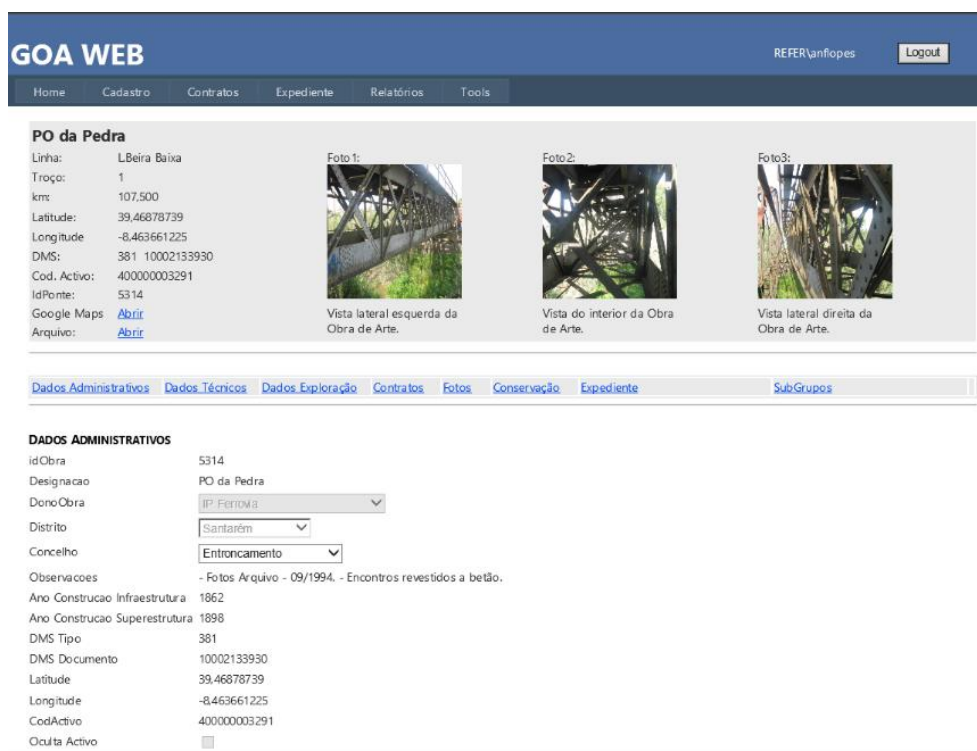


Figura 2.36 – Interface do GOA Web.

O sistema GOA organiza os dados relativos a cada Obra de Arte consoante se trate de:

- Inventário (Dados administrativos, dados técnicos e dados de exploração);
- Tipos de inspeção (Inspeções principais, inspeções de rotina, inspeções especiais, vistorias e inspeções subaquáticas);
- Contratos (Tipos de contrato existentes);
- Conservação (Relatórios de inspeção e manutenção);
- Fotos (Arquivo fotográfico da estrutura);
- SubGrupos.

O sistema funciona com uma base de dados, sistematizada e organizada, onde está contida toda a informação que possa interessar na gestão e manutenção das pontes existentes na rede.

2.5.3.1 Inventário

O inventário consiste no registo de toda a informação relevante correspondente às Obras de Arte. É constituído por dados relativos à identificação, localização e descrição.

Os dados relativos a cada Obra de Arte estão organizados em cinco tipos: dados administrativos, dados técnicos, dados de exploração, contratos, conservação e fotografias.

Nos dados administrativos está registada toda a informação que permite localizar, e identificar inequivocamente a Obra de Arte, assim como acessos e intersecções existentes. Nos dados técnicos, estão registados os dados relativos ao tipo e geometria da obra, dados da via e de constituição, onde é feita a divisão da obra por componentes, identificando a função de cada um no sistema estrutural. Nos dados de exploração, define-se a exploração da infraestrutura. Nos dados de contratos, indicam-se os contratos existentes para cada Obra de Arte. Nos dados de conservação, identificam-se todas as campanhas de inspeção e manutenção executadas, e finalmente, nas fotografias da obra, encontra-se o registo fotográfico de cada Obra de Arte.

- Tipos de Obras de Arte

Definem-se como Obras de Arte, todas as estruturas que possuam um vão livre, isto é, a distância entre paramentos de encontros ou apoios intermédios igual ou superior a 2,0 m. Caso o vão seja inferior à referida medida, designa-se por Aqueduto ou Galeria Técnica, consoante a sua finalidade.

As pontes ferroviárias classificam-se de acordo com a sua função na infraestrutura. Tendo por base o caminho-de-ferro, as Obras de Arte distinguem-se consoante as vias de intersecção passem por cima ou por baixo da via férrea principal.

Posto isto, podem dividir-se as de Obras de Arte em três grupos, o primeiro grupo que compreende as passagens superiores, representadas na Tabela 2.3, o segundo grupo que engloba as passagens inferiores, representadas na Tabela 2.4 e por fim, o terceiro grupo que engloba as passagens hidráulicas, as pontes e os viadutos, representados na Tabela 2.5.

Tabela 2.3 - Classificação das Obras de Arte: Passagens Superiores.



Designação	Definição	Ilustração
Passagem Superior (PS)	A via férrea passa sob a Obra de Arte e a via superior não se destina exclusivamente a tráfego pedonal ou ciclável.	 <p>Linha do Algarve, PS ao Pk 317+840</p>
Passagem Superior Pedonal (PSP)	A via superior destina-se apenas a tráfego pedonal.	 <p>Linha do Algarve, PSP ao Pk 307+080</p>

Tabela 2.4 - Classificação das Obras de Arte: Passagens Inferiores.



Designação	Definição	Ilustração
Passagem Inferior (PI)	A via férrea passa sobre a Obra de Arte. O principal motivo da sua construção é o atravessamento de outra via e distingue-se da Passagem Hidráulica por não atravessar qualquer linha de água.	 <p>Linha da Beira Alta, PI ao Pk 51+400</p>
Passagem Inferior Pedonal (PIP)	O principal motivo que despoletou a sua construção foi o atravessamento de uma via para tráfego pedonal ou ciclável e a via férrea passa sobre a Obra de Arte.	 <p>Ramal de Braga, PIP ao Pk 44+125</p>

Tabela 2.5 - Classificação das Obras de Arte: Passagens Hidráulicas, Pontes e Viadutos.























Designação	Definição	Ilustração
Passagem Hidráulica (PH)	A via férrea passa sobre a Obra de Arte e a via intersetada é uma linha de água.	 <p>Linha da Beira Alta, PH ao Pk 71+873</p>
Ponte (PO)	Passa sobre um curso de água e distingue-se da Passagem Hidráulica pelo facto de apresentar um comprimento entre encontros igual ou superior a 10,0 m.	 <p>Linha do Douro, PO das Quebradas ao Pk 67+934</p>
Viaduto (VU)	Atravessa um vale ou depressão geográfica, podendo existir ou não vias intersetadas ou até mesmo linhas de água. Distingue-se da Passagem Inferior, pelo facto de possuir um comprimento entre encontros igual ou superior a 10,0 m.	 <p>Linha do Vouga, VU ao Pk 31+098</p>

- Tipos de estrutura

Face à complexidade estrutural das Obras de Arte, torna-se fundamental definir o tipo de estrutura que melhor se adequa à Obra de Arte em análise.

Na Tabela 2.6 encontram-se representados os esquemas estruturais mais correntes. É importante salientar que a correta identificação do tipo de estrutura e o conhecimento do seu funcionamento estrutural, é fundamental aquando a realização da inspeção, na medida em que permite interpretar a gravidade e as possíveis consequências das anomalias identificadas, em função da sua localização.

Tabela 2.6 – Tipos de estrutura para caracterização das Obras de Arte.

Quadro		Pórtico		Estrutura Tubular	
					
Arco Pré-Fabricado		Arco (Simples ou múltiplo)		Bowstring	
					
Tabuleiro Simplesmente Apoiado		Vãos Múltiplos		Alvenaria Alargada	
					
Suspensa		Tirantes			
					

Pode dar-se o caso em que a estrutura em análise se enquadra em mais do que uma das tipologias anteriormente apresentadas, não existindo uma que prevaleça sobre as restantes. Quando assim é, diz-se que a estrutura possui um misto de soluções.

Por outro lado, o funcionamento estrutural da Obra de Arte pode não ser descrito por nenhuma das tipologias apresentadas. Neste caso, deve realizar-se uma descrição específica do tipo de estrutura.

- Localização da Obra de Arte

Na rede ferroviária a localização da Obra de Arte é definida através de certos parâmetros, tais como, a designação atual e antiga da Linha, Troço, Ramal ou Concordância, o Km de entrada e saída, as coordenadas ao eixo (longitudinal) da Obra de Arte e estações e apeadeiros colaterais.

- Tipo de exploração

No que respeita ao tipo de exploração, podem enquadrar-se as Obras de Arte nas categorias descritas na Tabela 2.7. Todas as características das linhas/troços, ramais

e concordâncias pertencentes à Rede Ferroviária Nacional, estão indicadas na Instrução de Exploração Técnica N° 50 (IET50).

Tabela 2.7 – Tipo de exploração (adaptado de [IP, 2017]).

Classificação	Definição
Linhas com exploração	As Obras de Arte inserem-se em linhas/ troços, ramais ou concordâncias classificadas na IET 50 como vias em exploração ferroviária.
Linhas sem exploração	As Obras de Arte inserem-se em linhas/ troços, ramais ou concordâncias classificadas na IET 50 como vias sem exploração ferroviária. As vias não são utilizadas para exploração comercial de transporte de pessoas e bens, no entanto, podem permitir a circulação de equipamentos ferroviários que se destinem a outros fins, mediante autorização do gestor de infraestruturas. São excluídas desta classificação as Obras de Arte em Linhas concessionadas.
Obras de Arte desativadas	Obras de Arte que já não estejam inseridas em linhas/troços, ramais ou concordâncias. Com ou sem exploração.
Linhas concessionadas	As Obras de Arte inserem-se em linhas/troços, ramais ou concordâncias com contrato ou protocolo de concessão.
Ramais privados	As Obras de Arte inserem-se em ramais de outras entidades, mas com inspeção e manutenção contratada à Infraestruturas de Portugal.

2.5.3.2 Tipos de inspeção e periodicidade

As campanhas de inspeção permitem um conhecimento do estado de conservação das Obras de Arte, do modo como evoluem as suas anomalias, caso existam, e as necessidades de manutenção associadas.

As inspeções são realizadas por técnicos pertencentes a brigadas de inspeção, por forma a garantir a elevada qualidade das avaliações efetuadas. Os técnicos visitam o local e efetuam uma meticolosa inspeção visual da Obra de Arte, e caso se justifique, recorrem a outros meios auxiliares, que permitam fazer o diagnóstico da estrutura.

- Inspeções Principais

As Inspeções Principais realizam-se periodicamente, em ciclos de 5 anos (60 meses), e têm como objetivo determinar o estado de conservação das Obras de Arte, identificar quaisquer anomalias existentes ou em desenvolvimento, assim como, garantir que a estrutura continua a satisfazer as exigências estruturais de segurança e funcionalidade (IP, 2017).

A Inspeção Principal consiste na recolha de toda a informação relativa a cada componente que constitui a Obra de Arte, no seu registo fotográfico pormenorizado, assim como na localização e descrição detalhada de todos os danos visíveis. No âmbito desta inspeção, realizam-se propostas para trabalhos de intervenção, os quais retifiquem anomalias encontradas e restabeçam o correto funcionamento da Obra de Arte. As referidas intervenções são priorizadas de acordo com a classificação atribuída à obra, na sequência da Inspeção Principal.

A classificação consiste na atribuição de um Índice de Avaria – IA, o qual varia entre 0 e 4, sendo o IA4 a situação mais gravosa e o IA0 a situação mais favorável. A atribuição de um $IA \geq 3$, pressupõe a necessidade de implementar uma ação corretiva a curto prazo ou imediata, pois significa que a integridade da estrutura se encontra comprometida. Existem componentes que afetam diretamente o IA atribuído à Obra de Arte, sendo eles, os Muros de Contenção, Encontros, Aparelhos de Apoio, Pilares, Tabuleiro e Estrutura de Suporte ao Tabuleiro. Significa isto, que o IA atribuído à Obra de Arte, nunca pode ser inferior ao IA atribuído a qualquer um destes componentes. Em suma, o IA espelha a condição estrutural da Obra de Arte, e permite priorizar as necessidades de intervenção numa escala temporal, encontrando-se informação relativa aos Índices de Avaria das estruturas, representada na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Classificação do Índice de Avaria das estruturas (adaptado de [IP, 2017]).

Índice	Definição	Seguimento
0	Estado normal de funcionamento	-
1	Existência de defeitos que ainda não afetam o seu funcionamento	Nada/Ação corretiva a longo prazo
2	Estado de falha provável ou latente	Ação corretiva a médio prazo
3	Estado de falha eminente	Ação corretiva a curto prazo
4	Estado de falha	Ação corretiva imediata

A atribuição de um determinado Índice de Avaria em detrimento de outro, resulta de diversas ações incluídas na Inspeção Principal, aplicadas consoante o tipo de estrutura em avaliação e as condições existentes para a sua realização. Assim, as atividades que contribuem para a escolha do IA a atribuir são as seguintes: inspeção visual, realização de ensaios não destrutivos ou semi-destrutivos, inspeções subaquáticas, nivelamentos geométricos de precisão, batimetria ou levantamento topo-hidrográfico, aquisição de imagens de sonar, entre outros.

- Inspeções de Rotina

As Inspeções de Rotina, distinguem-se das Inspeções Principais pelo facto de não possuírem qualquer tipo de classificação. Trata-se de inspeções de natureza expedita, que visam o registo das principais anomalias existentes nas estruturas, assim como o seu desenvolvimento, e consoante a sua complexidade, poderá existir a necessidade de realizar uma avaliação mais profunda. Caso as situações detetadas interfiram com a segurança, devem ser imediatamente comunicadas aos órgãos ou entidades competentes.

- Inspeções Especiais

As Inspeções Especiais, caracterizam-se por não serem programadas, ou seja, surgem sempre que se considere necessário analisar com mais pormenor alguma anomalia encontrada. São assim, inspeções extraordinárias, que complementam o diagnóstico e possíveis dúvidas sobre a condição da Obra de Arte, que podem surgir na sequência das Inspeções Principais. Têm como ações complementares, a realização de ensaios, levantamentos topográficos, e um mapeamento detalhado de anomalias (IP, 2017).

- Vistorias

As Vistorias permitem verificar a conformidade das Obras de Arte para a sua utilização. Realizam-se no âmbito de receções provisórias ou definitivas, auxiliando na decisão de rececionar determinada intervenção. Realizam-se posteriormente a ações de reabilitação, construção ou substituição, e são suportadas por relatórios técnicos, os quais garantem ou não a conformidade, de acordo com os documentos normativos em vigor. São realizadas por equipas qualificadas de inspeção, recorrendo sempre que necessário, a ensaios não destrutivos ou semi-destrutivos.

- Inspeções Subaquáticas

A Inspeção Subaquática funciona como uma ação complementar no âmbito das Inspeções Principais, por forma a permitir acesso a elementos das Obras de Arte que se encontrem submersos, tais como, pilares e encontros fundados em leitos de rios. Na sequência desta inspeção, é elaborado um relatório escrito, contemplando o registo e identificação de todas as anomalias que podem comprometer o bom funcionamento estrutural dos componentes submersos, assim como o registo das condições funcionais em que se realizou a inspeção (IP, 2017).

Usualmente, estas inspeções complementam-se com Levantamentos Batimétricos, os quais permitem o registo das cotas de fundo do leito das linhas de água, e em certos casos, a aquisição de imagens dos próprios elementos submersos. Na Tabela 2.9 encontra-se resumida a informação no que respeita à periodicidade de inspeção a Obras de Arte.

Tabela 2.9 – Periodicidade das inspeções a Obras de Arte (adaptado de [IP, 2017]).

Tipo de Inspeção	Ciclo (Meses)
Inspeção de rotina	15
Inspeção de rotina em obras sem exploração	45
Inspeção principal	60
Inspeção principal a Obras de Arte com IA ≥ 3	12
Inspeção especial	Variável

2.6 Considerações finais

A preservação e conservação do património ferroviário, tem vindo a tornar-se imperativa ao longo do tempo. No caso específico das pontes ferroviárias, justifica-se a implementação de sistemas de gestão que permitam ao utilizador analisar e avaliar o estado da obra de arte, de maneira a proceder à melhor decisão no que respeita à manutenção e intervenção, tendo sempre em consideração os custos que possam implicar.

A melhoria contínua dos sistemas de gestão permite uma gestão otimizada das Obras de Arte, evitando assim decisões como substituição completa de pontes. Para tal, é necessário direcionar os sistemas para análises mais abrangentes, isto é, análises que permitam definir a melhor estratégia de intervenção tendo em conta o estado de

degradação da estrutura ao longo do tempo, os meios disponíveis, os custos associados e as questões de segurança e viabilidade estrutural.

Posto isto, justifica-se um investimento no desenvolvimento de algoritmos computacionais que permitam prever os modelos de degradação das Obras de Arte, apostando numa manutenção preventiva a longo prazo, otimizando desta forma os recursos existentes para que seja feita uma gestão viável deste património.

3 Principais anomalias em pontes ferroviárias de estrutura metálica

3.1 Considerações iniciais

O processo de degradação em pontes ferroviárias metálicas tem vindo a tornar-se um tema muito estudado, uma vez que estas estruturas se encontram expostas a inúmeras causas de degradação ao longo da sua vida útil.

Muitas das anomalias observadas neste tipo de estruturas metálicas poderiam ser evitadas na fase de projeto. Um projeto bem executado pode evitar muitos dos problemas ligados ao aparecimento de corrosão, com estratégias simples como posicionamento de elementos estruturais de modo a impedir a acumulação de água e poeiras.

Em geral, o nível de desempenho desejado encontra-se diretamente ligado a ações de manutenção regulares, pois de um modo geral, as estruturas encontram-se sujeitas a vários mecanismos de deterioração em função do ambiente a que estão expostas, das características do próprio material de construção e de fatores externos.

O presente capítulo trata da identificação e descrição das principais anomalias presentes em pontes ferroviárias contruídas em estrutura metálica, assim como as causas que estão na sua origem. Neste contexto, apresenta-se numa primeira fase os fenómenos físicos de degradação associados a estruturas metálicas e numa segunda fase as anomalias por componente metálica da estrutura de uma ponte ferroviária.

3.2 Fenómenos associados à degradação de estruturas metálicas

Nesta secção descrevem-se os fenómenos de degradação mais frequentes em estruturas metálicas, procurando-se estabelecer as causas mais comuns do seu aparecimento.

3.2.1 Corrosão

A corrosão é dos principais fatores de degradação de estruturas metálicas. É um processo espontâneo, em que um metal ou liga metálica, se transformam num ião metálico pela interação química ou eletroquímica, com o meio envolvente. Trata-se de um processo eletroquímico, que aliado ou não a algum esforço mecânico, pode comprometer a durabilidade dos materiais.

Os metais corroem-se devido à instabilidade das suas formas puras. A maior parte dos metais existe na natureza sob a forma de compostos aos quais está associado um estado de energia mínimo, no entanto, esses compostos são extraídos e o metal é separado e transformado em diversos artigos. Por sua vez, o metal tende a regressar à forma combinada, ou seja, ao estado termodinamicamente estável.

No que respeita ao processo corrosivo, podem distinguir-se dois grupos:

- Corrosão química

A corrosão química é desencadeada pela exposição de um metal a temperaturas elevadas ou a uma atmosfera de um gás oxidante, por exemplo, o oxigénio. Este tipo de corrosão está associada à formação de uma película uniforme e aderente de produtos de corrosão que dependendo do meio e das condições segundo as quais se processa, pode funcionar como uma barreira protetora, retardando a continuidade do processo corrosivo (Helene, 1986).

- Corrosão eletroquímica

A corrosão eletroquímica desencadeia-se perante o contacto de um metal com um eletrólito ou uma atmosfera húmida, ocorrendo em simultâneas reações de oxidação e de redução. Este tipo de corrosão é o mais frequente na natureza e exige a presença de água no estado líquido.

De seguida, descrevem-se os tipos específicos de corrosão que podem afetar as estruturas, sendo a Figura 3.1 uma ilustração da sua possível aparência.

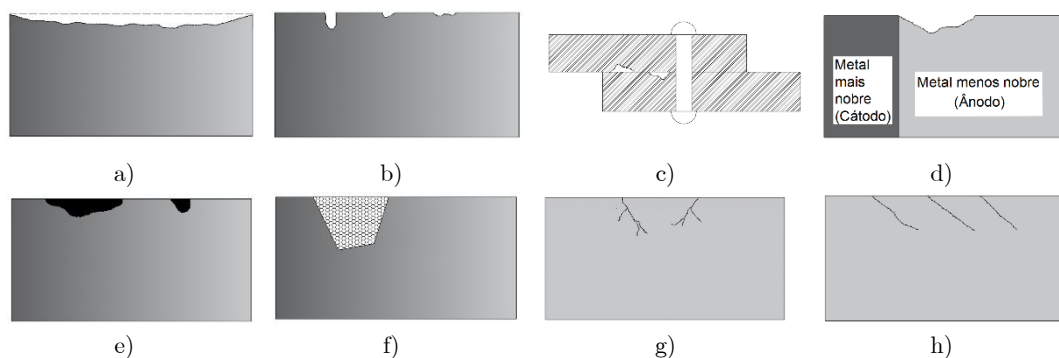


Figura 3.1 – Aparência do mecanismo de corrosão: a) Corrosão uniforme, b) Corrosão por picadas, c) Corrosão intersticial, d) Corrosão galvânica, e) Corrosão seletiva, f) Corrosão intergranular, g) Corrosão sob tensão e h) Corrosão sob fadiga (adaptado de [Roberge, 2007]).

3.2.1.1 Corrosão uniforme

A corrosão uniforme afeta de uma forma generalizada toda a superfície metálica, formando-se múltiplos ânodos e cátodos. O facto de ser uniforme facilita a sua monitorização, devido à sua perda de secção homogénea. No entanto, o seu acompanhamento torna-se fundamental na medida em que a perda de espessura e de massa provocam a redução da capacidade resistente da estrutura, podendo mesmo levar à rotura. Alguns exemplos comuns deste tipo de corrosão são: oxidação e escurecimento de superfície, ou dissolução ativa em ácidos.

3.2.1.2 Corrosão por picada

A corrosão por picadas caracteriza-se por ser altamente localizada, existindo degradação de pequenas áreas do metal. Devido ao facto de a maior parte do material permanecer inalterada, torna-se difícil detetar, podendo atingir uma profundidade considerável do material. Geralmente, acontece em metais passivos aquando na presença de iões agressivos, tais como Cl^- , como por exemplo, aços inoxidáveis, ligas de alumínio ou cromo.

3.2.1.3 Corrosão intersticial

A corrosão intersticial caracteriza-se pela ocorrência de fendas no interior. Trata-se de uma corrosão localizada, e o ataque está associado a pequenos volumes de solução estagnada onde a oxigenação é difícil. A privação de oxigénio leva a uma diminuição do pH, induzindo um meio com um nível de corrosividade mais elevado.

3.2.1.4 Corrosão galvânica

A corrosão galvânica ocorre pelo contacto de dois metais com diferente potencial de redução. Essa diferença de potencial origina a formação de um ânodo e de um cátodo, sendo que o metal cuja tendência à corrosão é superior trata-se da superfície sobre a qual ocorrem as reações anódicas e o metal com menor tendência à corrosão trata-se da superfície sobre a qual ocorrem as reações de redução. É muito comum este tipo de corrosão surgir em zonas de soldadura, tornando-se problemático caso o material da solda seja anódico relativamente ao metal base e os seus potenciais de redução sejam bastante diferentes.

3.2.1.5 Corrosão intergranular

A corrosão intergranular caracteriza-se por ocorrer junto aos limites dos grãos, criando grânulos no material. Os limites dos grãos são zonas mais desordenadas e com maior energia, podendo passar a ser anódicos em relação aos próprios grãos. Este tipo de corrosão é mais frequente em aços inoxidáveis aquecidos entre 500 °C e 800 °C durante um longo período de tempo.

3.2.1.6 Corrosão seletiva

A corrosão seletiva trata-se do processo em que existe formação de um par galvânico, produzido pela diferença entre a nobreza dos elementos constituintes das ligas metálicas. Um desses elementos é seletivamente removido, geralmente o menos nobre. Os exemplos mais comuns deste tipo de corrosão são a deszincificação, a qual ocorre em ligas de cobre-zinco com corrosão preferencial do zinco e a grafitização, processo no qual o ferro se oxida, o carbono permanece intacto (para as ligas ferro-carbono) e a área corroída adquire uma tonalidade escura característica da grafite.

3.2.1.7 Corrosão sob solicitações mecânicas

A combinação de corrosão com solicitação mecânica surge como consequência da interação de um meio agressivo com a tensão a que o material está sujeito.

3.2.1.7.1 Corrosão sob tensão

Na corrosão sob tensão verifica-se a ação simultânea da tensão aplicada e do meio corrosivo. Trata-se de um fenómeno localizado, pois a maior parte do material permanece intacta, enquanto alguns locais apresentam fissuras que vão progredindo através do metal ou liga metálica. Este tipo de corrosão surge preferencialmente em ligas metálicas.

Existem alguns fatores que influenciam este processo, tais como, a intensidade e o tipo de tensão de tração aplicada no material, o tipo de estrutura e a composição do próprio material, no sentido em que materiais com grãos de dimensão inferior apresentam menor grau de impurezas e maior resistência.

3.2.1.7.2 Corrosão sob fadiga

A corrosão sob fadiga consiste na deterioração do material resultante da ação conjunta entre o meio corrosivo e tensões cíclicas. Este tipo de corrosão observa-se, por exemplo, em caldeiras de vapor submetidas a ciclos de aquecimento e arrefecimento sucessivos, em reservatórios de água sujeitos a ciclos de enchimento e vazamento, ou peças metálicas expostas a variações diárias de temperatura.

3.2.1.7.3 Corrosão por erosão

A corrosão por erosão corresponde ao desgaste mecânico da superfície metálica, em simultâneo com o ataque de corrosão. A velocidade do processo corrosivo é acelerada pela erosão. Este tipo de corrosão observa-se em locais que possuam esgotos em movimento, despejos de produtos químicos e pontes onde exista ambiente marítimo.

3.2.1.8 Principais causas de corrosão em estruturas metálicas

O processo de corrosão pode ser potenciado por diversos fatores, como por exemplo, o tipo de material constituinte e a sua interação com o meio ambiente, a conceção da estrutura e as ações de manutenção realizadas.

3.2.1.8.1 Erros na fase de projeto e construção

Os erros de projeto são das principais causas do aparecimento de corrosão nas estruturas metálicas. Existem opções que potenciam o ataque dos agentes patogénicos responsáveis pela deterioração das estruturas. Alguns exemplos para o caso de estruturas metálicas podem ser:

- Ranhuras e arestas vivas, pois é nestes locais que existe falha prematura da pintura;
- Pontos de acumulação de água, onde não existem orifícios de escoamento;
- Contacto entre materiais com diferentes potenciais de redução, como é o exemplo das ligações entre parafusos e metal base ou soldadura e metal base;
- Proteção de superfície desadequada ao ambiente a que a ponte se encontra sujeita.

3.2.1.8.2 Qualidade dos materiais constituintes

A evolução dos materiais utilizados tem um impacto bastante significativo na história das técnicas de construção das estruturas metálicas. Desde meados do século XVIII, até meados do século XIX, o ferro fundido e o ferro pudlado eram os materiais mais utilizados.

A partir do século XIX, estes materiais começaram a ser substituídos pelo aço, devido às suas características mecânicas superiores. O tipo de aço mais utilizado em pontes tem baixo teor de carbono e apresenta um comportamento dúctil (Patrício, 2018).

A correta execução dos tratamentos térmicos, e de superfície dos materiais é imprescindível para a sua durabilidade.

3.2.1.8.3 Degradação microbiológica

O crescimento de vegetação, a presença de excrementos de animais ou a acumulação de detritos nas estruturas provoca a sua degradação precoce, caso não exista manutenção corrente. A Figura 3.2 ilustra alguns dos casos de ataque por agentes biológicos.



Figura 3.2 - Degradação por ataque de agentes biológicos: a) Muro de ala, b) Paramento frontal de um encontro e c) Envolvente de um encontro.

3.2.1.8.4 Meio envolvente

O meio envolvente tem um papel de destaque no que respeita ao aparecimento de corrosão. Uma vez que os mecanismos de corrosão são distintos no ar, na água e no solo, é usual diferenciar estes três tipos de ambiente de exposição. De entre os possíveis exemplos para cada um dos meios, destacam-se os seguintes:

- O teor de humidade existente no local influencia bastante o aparecimento da corrosão, no sentido em que elevada humidade e atmosfera agressiva são condições propícias a um grau de corrosividade superior;
- Zonas urbanas e industriais, onde predominam os sulfatos e cloretos, é um ambiente propício à formação de corrosão devido à poluição atmosférica;
- O ambiente marítimo, por ser rico em cloretos e possuir alta salinidade, é o ambiente de exposição com maior grau de corrosividade;

- No que respeita aos solos, solos argilosos possuem partículas muito finas, com baixa permeabilidade, tendo por isso tendência para reter humidade, formando um ambiente bastante favorável ao aparecimento de corrosão. O pH do solo também influencia significativamente o processo corrosivo, no sentido em que solos mais ácidos apresentam uma relação de proporcionalidade direta com a velocidade de corrosão.

3.2.1.8.5 Manutenção das estruturas

As pontes metálicas estão sujeitas às mais variadas ações, as quais podem desencadear diferentes processos de deterioração. Assim sendo, é indispensável implementar ações de manutenção e reabilitação que garantam um nível de segurança compatível com a sua utilização.

Simples ações de manutenção como limpeza das estruturas, manutenção do sistema de drenagem, ou impermeabilização de tabuleiros reduzem a probabilidade de avarias, prolongando, assim, a vida útil das pontes.

3.2.2 *Fadiga*

De acordo com a NP EN 1993-1-9:2010 (CEN, 2010), a fadiga pode ser definida como o processo de iniciação e propagação de fendas num determinado elemento estrutural, desencadeado por flutuações de tensão.

O aparecimento de fissuras em estruturas metálicas pode ter origem na fadiga, efeitos de choque (embate de veículos, por exemplo) ou efeitos dinâmicos, e a sua propagação sem monitorização poderá conduzir a mecanismos de colapso da estrutura. Geralmente, localizam-se em zonas de concentração de tensões, ou seja, zonas de mudança de secção, onde existam defeitos de soldadura, cargas pontuais, efeitos de entalhe ou defeitos metalúrgicos (Branco et al., 1999).

Para que haja a formação de fissuras por fadiga, é necessária a ocorrência simultânea de três fatores, sendo eles, a variação significativa de tensões aplicadas, o valor das referidas tensões deve ser suficientemente elevado, assim como o número de ciclos de variação de tensão.

O processo que conduz à rotura por fadiga, pode ser explicado em três fases, de acordo com (WP4, 2007):

- i. Início da fendilhação: começa por se formar uma fenda na microestrutura do material. As fendas iniciam-se através de deformações plásticas devido à tensão nos cristais de aço.
- ii. Propagação da fendilhação: a fenda começa a desenvolver-se ao longo da peça. A propagação da fendilhação, deve-se aos carregamentos cíclicos contínuos, sendo que o seu crescimento depende da estrutura interna do material e do tamanho dos cristais de aço, os quais condicionam a direção das fendas, assim como a capacidade de suportar a fadiga aquando o início da fendilhação. No entanto, numa fase final, as fendas acabam por tomar a direção normal ao eixo do campo das tensões principais de tração.
- iii. Crescimento rápido da fenda: a peça atinge a rotura rapidamente. Nesta fase, dá-se a rotura do elemento ou da peça metálica, por incapacidade de resistir às cargas aplicadas.

No caso das pontes metálicas centenárias, os níveis de danos em elementos estruturais sujeitos a elevados ciclos de tensão dependem da composição química do material utilizado à época, assim como das técnicas de laminagem utilizadas. A questão da resistência à fadiga em pontes metálicas com idade avançada possui grande interesse, pois no caso das intervenções de reabilitação e reforço serem demasiado complexas e dispendiosas, pode dar-se o caso de se cessar a exploração da ponte.

3.2.2.1 Principais causas da formação de fissuras por fadiga

O processo de formação de fissuras por fadiga pode ter origem em ações exteriores e acidentais, em modificações relativas às condições de exploração das Obras de Arte, ou no aparecimento de patologias associadas à falta de manutenção das estruturas.

3.2.2.1.1 Erros na fase de projeto e construção

Grande parte das pontes ferroviárias de estrutura metálica foram executadas aquando a construção da linha em que se encontram inseridas. Dependendo da época, podem ter como material constituinte ferro pudlado, aço ou ferro fundido. Uma vez que se tratam de estruturas antigas, o efeito da fadiga representa um papel importante, dado o número de ciclos de carga a que já foram sujeitas (Branco et al., 1999).

De entre os pormenores construtivos que potenciam a formação de fissuras por fadiga, destacam-se os seguintes:

- Fracas ligações entre os elementos estruturais principais e secundários, por exemplo, ausência de chapas de ligações entre longarinas e vigas principais;
- Variações bruscas de secção, originando um aumento das tensões instaladas;
- Defeitos no cordão de soldadura;
- Esforços secundários, tais como deslocamentos excessivos;
- Frequência de circulação ferroviária superior à prevista inicialmente;
- Deficiência no processo de rebitagem, as fissuras por fadiga originam-se, em grande parte dos casos, no furo de rebite, em forma de estrela. Muitas destas fissuras são resultado de uma má execução durante o processo de montagem (N. Santos, 1998).

3.2.2.1.2 Manutenção das estruturas

A falta de manutenção das estruturas conduz ao aparecimento de corrosão, a qual associada a ciclos de tensão, é propícia à formação de fissuras. Algumas das reparações em pontes metálicas, mal executadas, também estão na origem da formação de fissuras, tais como, materiais de soldadura mal selecionadas ou soldadura executada de forma incorreta.

3.2.3 *Rotura frágil*

As anomalias presentes nas estruturas metálicas não se resumem a causas estruturais, em muitos dos casos estão associadas a roturas frágeis ou fenómenos de fadiga dos materiais.

O aço nem sempre apresenta um comportamento dúctil, podendo, perante certas condições, apresentar rotura frágil a partir da formação de fendas. De entre os vários exemplos de colapso de estruturas metálicas por rotura frágil, destaca-se o da ponte “Kings Bridge” sobre o rio Yarra, em Melbourne no ano de 1962.

Existem vários fatores responsáveis pela rotura frágil do aço, de entre os quais se destacam:

- Temperaturas baixas;
- Concentração de tensões, tais como as que ocorrem na zona da soldadura e junto dos entalhes;
- Composição e defeitos de fabrico do material.

3.2.4 *Encurvadura*

A encurvadura é o fenómeno mais comum nas estruturas metálicas. A capacidade que o aço tem para suportar tensões elevadas, permite que as secções transversais das peças metálicas tenham secções transversais reduzidas, aumentando assim, a sua deformabilidade. A encurvadura não passa de uma consequência da referida deformabilidade, quando uma peça está sujeita a esforços de compressão.

Naturalmente, a existência de imperfeições geométricas nas peças provoca a diminuição da carga de colapso da peça, motivo pelo qual a medição das imperfeições geométricas de uma peça metálica que já esteja em serviço é crucial para a avaliação da sua reserva de resistência.

3.2.5 *Sobrecargas ferroviárias*

As sobrecargas ferroviárias representam uma das principais causas do aparecimento de anomalias em pontes. Com o passar do tempo, verifica-se, cada vez mais, um aumento das cargas por eixo e da velocidade das circulações, tornando-se necessária a constante revisão dos regulamentos existentes à época.

Vários estudos demonstram que os danos resultantes da fadiga, em pontes antigas provêm, em cerca de 90%, do tráfego ferroviário posterior a 1945, devido ao aumento da velocidade de circulação e das cargas por eixo (Calgaro & Lacroix, 1997).

O anexo D da norma EN 1991-2 (CEN, 2003), o qual apresenta as bases para avaliação da fadiga em pontes ferroviárias, especifica 12 comboios tipo, assim como as suas frequências de circulação para os vários tipos de tráfego, ligeiro, pesado e misto (Patrício, 2018).

Uma vez que os comboios que circulam na rede ferroviária possuem características diferentes, os estudos realizados pela UIC - *International Union of Railways* permitiram elaborar um modelo de cargas que simula a envolvente de vários comboios, reduzindo, assim, o risco de uma mudança nas características do tráfego que não respeitasse os estados limites de segurança.

O modelo de cargas denomina-se por LM71 e possui as características representadas na Figura 3.3.

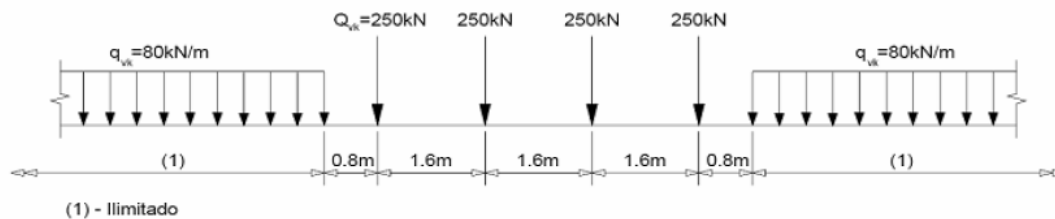


Figura 3.3 – Esquema de carga LM71 (adaptado de [CEN, 2003]).

Segundo a EN 1991-2 (CEN, 2003), o modelo deve ainda ser afetado por um coeficiente de ponderação (α), para o qual são referidos os seguintes valores, 0,75 - 0,83 - 1,00 - 1,10 - 1,21 - 1,33 - 1,46 que devem ser aplicados consoante o tipo de tráfego a que a estrutura esteja sujeita.

Para além do modelo LM71, existem outros modelos a adicionar ao anterior por forma a considerar o comportamento das pontes de vão contínuo (SW/0) e o efeito do tráfego de mercadorias (SW/2). No entanto, de acordo com (Pereira, 2008) estes só devem ser utilizados caso não se majore o comboio LM71 com o parâmetro α . O esquema de carga referente aos modelos apresentados encontra-se representado na Figura 3.4.

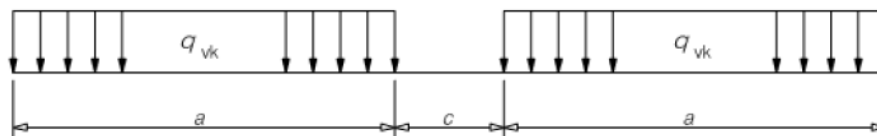


Figura 3.4 – Esquema de carga SW/0 e SW/2 (adaptado de [CEN, 2003]).

Os valores adotados para o carregamento vertical dos esquemas SW/0 e SW/2 encontram-se representados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores característicos do carregamento vertical para os esquemas de carga SW/0 e SW/2.

Esquema de carga	q_k [kN/m]	a [m]	c [m]
SW/0	133	15,0	5,3
SW/2	150	25,0	7,0

Assim, torna-se necessário verificar a segurança de pontes que se encontrem em serviço e que tenham sido dimensionadas de acordo com regulamentos antigos, de modo a verificar a conformidade e segurança dos regulamentos e cargas atuais.

3.3 Principais anomalias por componente

Nas estruturas metálicas, os mecanismos de degradação devem-se, em grande parte, ao ambiente em que se encontram inseridas. A deterioração deste tipo de estruturas ocorre essencialmente devido a fenómenos de corrosão, fadiga, ou defeitos geométricos das peças.

Uma vez descritos os fenómenos que estão na origem da maior parte das anomalias presentes nas estruturas metálicas, particularmente de pontes ferroviárias, resumem-se, nos próximos pontos, algumas das anomalias mais comuns observadas por componente metálica. De referir que será dada especial atenção ao tabuleiro, estrutura de suporte ao tabuleiro, aparelhos de apoio, guarda corpos e passeios. No que respeita aos pilares metálicos, uma vez que as anomalias são em tudo semelhantes às anomalias referidas para o tabuleiro e respetiva estrutura de suporte, apenas serão apresentados exemplos para estes últimos.

3.3.1 Anomalias no tabuleiro e na estrutura de suporte ao tabuleiro

O tabuleiro das pontes, é essencialmente composto por longarinas situadas sob os carris, as quais apoiam sobre carlingas, que por sua vez apoiam nas vigas principais, pertencentes à estrutura de suporte. Muitos destes elementos estão suscetíveis a diversos tipos de anomalias, tanto estruturais como não estruturais.

De entre as anomalias mais comuns nestes componentes, encontram-se as deformações de elementos (Figura 3.5). Estas deformações podem ser globais ou localizadas, dependendo se afetam apenas uma parte específica da obra ou a sua totalidade. As deformações locais, mais comuns, aparecem devido a esforços pontuais, já as deformações globais, são mais difíceis de observar e podem ser originadas por deslocamentos dos aparelhos de apoio, ou sobrecargas aplicadas na estrutura, superiores àquelas que a mesma consegue suportar (V. Costa, 2009).



Figura 3.5 – Deformação local de elementos metálicos: a) No tabuleiro e b) Na estrutura de suporte.

Analogamente aos outros componentes metálicos, a degradação da proteção de superfície, como empolamento (Figura 3.6a) ou delaminação (Figura 3.6b), pode evoluir para um processo de corrosão (Figura 3.6c).

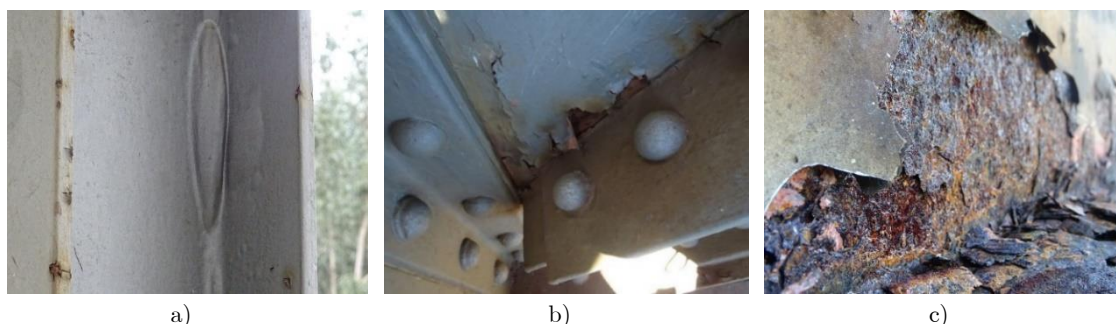


Figura 3.6 – Anomalias registadas no tabuleiro e respetiva estrutura de suporte: a) Empolamento da proteção de superfície, b) Delaminação da proteção de superfície e c) Corrosão de elementos metálicos.

Ao nível das ligações rebitadas, pode dar-se o caso de aparecerem rebites “leves” com ligeiro batimento (Figura 3.7a), reconhecido pelo som quando em contacto com o martelo ou por análise visual cuidada, verificando-se a existência de incorreções na formação da cabeça.

Outra anomalia que se verifica é a falta de cabeças de rebites (Figura 3.7b), anomalia esta que deverá ser prontamente comunicada por forma a ser alvo de reparação imediata.

Nas ligações soldadas, existe uma tendência natural ao aparecimento de fissuras por fadiga, especialmente no fim da soldadura (Figura 3.7c), as quais deverão ser imediatamente reparadas caso se tratem de elementos críticos.

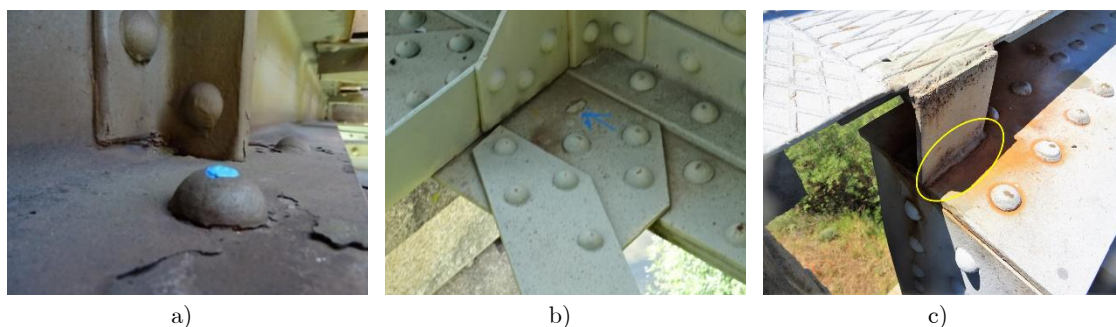


Figura 3.7 – Anomalias registadas em ligações rebitadas e soldadas: a) Rebite “leve”, b) Falta de cabeça de rebite e c) Fissuração em ligações soldadas.

Finalmente, devido aos elevados ciclos de carga a que as pontes ferroviárias estão sujeitas, é comum encontrarem-se fissuras em elementos metálicos (Figura 3.8), nomeadamente em montantes e contraventamentos verticais e horizontais. As fissuras encontradas deverão sempre ser identificadas e monitorizadas, por forma a tomar uma decisão consciente e racional no que respeite à reparação ou substituição das peças.

Um aspeto decisivo no que respeita à formação de fissuras, é a temperatura. Quanto mais baixa for a temperatura ambiente, mais forte é a tendência para ocorrência de fissuração. Outro fator igualmente importante corresponde à idade da estrutura, pois em aços mais antigos, com cerca de mais de 30 anos de idade, é frequente a existência de zonas com segregações ou folheamento, defeitos que reduzem substancialmente a resistência do aço.



Figura 3.8 – Fissuração de elementos metálicos: a) Gousset de ligação e b) Face inferior do banzo da viga principal.

3.3.2 Anomalias nos aparelhos de apoio

Os aparelhos de apoio devem ser inspecionados regularmente, no entanto, muitas vezes não se trata de uma tarefa fácil, devido ao local de difícil acesso em que se encontram inseridos. Estes elementos, determinam de forma decisiva o comportamento das pontes, chegando a contribuir para o aparecimento de anomalias em toda a estrutura, caso apresentem condições deficientes de funcionamento.

As anomalias observadas nos aparelhos de apoio podem ser classificadas tendo em conta o tipo de aparelho em causa e o movimento permitido. Consoante o tipo de anomalia que se identifique, podem resumir-se as causas que lhes deram origem, sendo as mais comuns, deficiências de fabrico, erros de montagem, falta de manutenção ou conservação, ou ocorrência de acidentes. De referir que no presente trabalho apenas serão analisados aparelhos de apoio metálicos.

Algumas das anomalias mais correntes são a falta de lubrificação em aparelhos de apoio (Figura 3.9a) e delaminação da proteção de superfície (Figura 3.9b).



Figura 3.9 - Anomalias correntes em aparelhos de apoio: a) Falta de lubrificação em aparelhos de apoio; b) Delaminação da proteção de superfície.

Além destas anomalias, é comum observar ainda a corrosão de elementos metálicos (Figura 3.10a) e batimentos (Figura 3.10b).



Figura 3.10 - Anomalias correntes em aparelhos de apoio: a) Corrosão de elementos metálicos e b) Existência de batimentos em aparelhos de apoio.

A manutenção deste componente deve incidir sobre a sua limpeza e lubrificação, por forma a permitir os movimentos de translação associados às variações de temperatura. Quando as deformações induzidas são superiores às suportadas pelos aparelhos de apoio, como consequência de impedimentos ao movimento, introduzem-se esforços secundários na estrutura. Outro exemplo bastante comum em aparelhos de apoio que possuam rótulas, é a corrosão das mesmas. Esta anomalia irá provocar o impedimento da rotação e, conseqüentemente, poderão ser introduzidos esforços secundários na estrutura. A ocorrência de um sismo poderá ter como consequência o desalinhamento de rolos, que conjuntamente com a contínua passagem de circulações, introduz esforços por empenamento na estrutura. Outra anomalia a não descurar prende-se com a deterioração da argamassa de assentamento, pois aliada a esta anomalia podem existir batimentos à passagem de circulações, conduzindo a assentamentos ou deformações dos aparelhos de apoio, que podem estar na origem da introdução de esforços e deformações indesejáveis na estrutura (Cavadas, 2008).

De seguida, apresenta-se na Tabela 3.2 um resumo das anomalias mais comuns, assim como as possíveis causas que lhe deram origem, de acordo com o tipo de aparelho de apoio.

Tabela 3.2 – Anomalias em aparelhos de apoio metálicos e causas prováveis (adaptado de [Freire, 2008]).

Tipo de aparelho de apoio	Anomalias	Causas prováveis
 <p>Rolos seccionados</p> <p>Rolos circulares</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Inclinação excessiva de rolos seccionados; - Fissuração ou rutura dos rolos; - Transposição da guia ou tranca dos rolos; - Corrosão do aço por perda de revestimento exterior; - Impedimento de deslocamento por deposição de detritos; Impedimento de deslocamento por corrosão ou rotação excessiva. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobrecargas excessivas; - Erros de montagem; - Deficiente dimensionamento; - Deficiente funcionamento (por exemplo, a queda de balastro, impede os movimentos, conduzindo a um mau funcionamento).
 <p>Panela (<i>Pot Bearing</i>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de lubrificação; - Compressão elevada/esmagamento; - Deformação lateral elevada, que pode conduzir à saída da panela; - Corrosão e/ou fissuração de partes metálicas; - Deslocamento por obstrução das folgas entre a tampa e a panela. 	<ul style="list-style-type: none"> - Deficiente colocação; - Deficiente manutenção; - Deficiente dimensionamento.
 <p>Placas, face plana</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosão de elementos metálicos; - Degradação das ligações rebitadas ou aparafusadas; - Impedimento de rotação ou deslocamento por corrosão excessiva. 	<ul style="list-style-type: none"> - Deficiente colocação; - Deficiente manutenção; - Deficiente dimensionamento; - Sobrecargas excessivas.
 <p>Neoprene (elastómero)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Destacamento das camadas de neoprene; -Esmagamento do neoprene; - Distorção elevada; - Deslocamento sobre o suporte; - Corrosão de partes metálicas; Deterioração ou má fixação entre componentes; - Impedimento de deslocamento por deposição de detritos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Deficiente dimensionamento; - Deficiente funcionamento (por exemplo, a queda de balastro, impede os movimentos, conduzindo a um mau funcionamento); - Defeitos do material; - Causas acidentais; - Sobrecargas excessivas.

3.3.3 Anomalias nos guarda corpos e passeios

Os guarda corpos têm como principal função a proteção do trânsito pedonal sobre a estrutura, enquanto os passeios permitem a deslocação do inspetor do início ao fim da ponte, facilitando assim o trabalho de reconhecimento visual das anomalias existentes.

A elevada exposição aos agentes atmosféricos, como chuva, o sol ou o vento, provoca danos na proteção de superfície dos componentes e conseqüentemente, pode despoletar o aparecimento de corrosão.

Na Figura 3.11 podem observar-se alguns exemplos da degradação da proteção de superfície dos componentes guarda corpos e passeios, tais como descoloração, oxidação e delaminação.

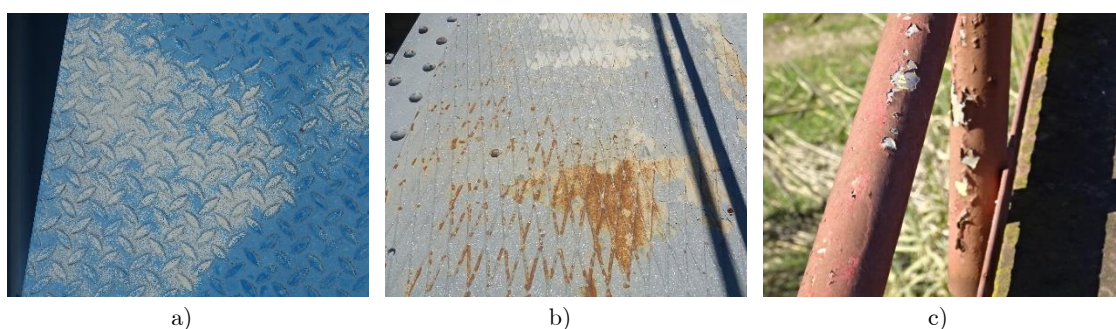


Figura 3.11 – Anomalias da proteção de superfície dos guarda corpos e passeios de manutenção: a) Descoloração, b) Oxidação e c) Delaminação.

Uma vez iniciado o processo de degradação da proteção de superfície, caso não sejam tomadas medidas de reparação, a deterioração tende a evoluir para o aparecimento de corrosão (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Aparecimento de corrosão em elementos metálicos de guarda corpos e passeios.

Por vezes, podem ocorrer acidentes que danificam os guarda corpos, partindo ou deformando elementos metálicos. Na Figura 3.13 encontram-se representados alguns exemplos deste tipo de anomalias.



Figura 3.13 – Deformação e ruptura de elementos metálicos dos guarda corpos: a) Deformação e b) Ruptura.

Os passeios, por possuírem, normalmente uma estrutura de suporte cujas ligações são aparafusadas, têm tendência a apresentar anomalias que se prendem com a falta de parafusos de ligação, parafusos “leves”, e ainda corrosão de parafusos. A Figura 3.14 retrata alguns exemplos destas anomalias.

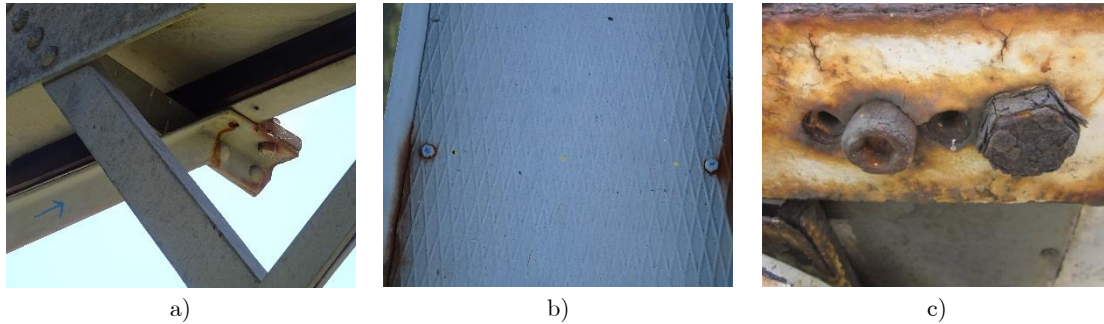


Figura 3.14 – Anomalias nas ligações aparafusadas da estrutura de suporte do passeio de manutenção: a) Falta de parafusos, b) Parafusos “leves” e c) Corrosão de parafusos.

Ainda na estrutura de suporte do passeio, é recorrente o aparecimento de fissuras (Figura 3.15) em elementos de ligação como *goussets* devido a fenómenos de fadiga, ou esforços elevados.



Figura 3.15 – Fissuração de elementos metálicos na estrutura de suporte do passeio.

Devido à sua espessura reduzida, é bastante comum encontrar chapas de passeio deformadas (Figura 3.16), as quais representam pontos suscetíveis para aparecimento de corrosão, devido à quantidade de água que se acumula no local da deformação.



Figura 3.16 – Empeno de chapas de passeio.

Uma outra anomalia bastante comum nas chapas de passeio, é encontrar dobradiças partidas na chapa que funciona como porta de acesso às escadas que permitem efetuar a inspeção da parte inferior da Obra de Arte. Na Figura 3.17 podem verificar-se alguns exemplos desta anomalia.



Figura 3.17 – Dobradiças partidas.

3.4 Considerações finais

Com o presente capítulo procurou-se identificar os principais fatores de degradação em estruturas metálicas, desde corrosão, fadiga, roturas frágeis, fenómenos de encurvadura, vibrações e esforços secundários e até mesmo sobrecargas ferroviárias, uma vez que o presente estudo se foca em pontes ferroviárias.

Descreveram-se os principais mecanismos de degradação por componente metálico, efetuando uma correlação entre anomalias e as respetivas causas que se encontram na sua origem.

Importa salientar que uma boa deteção de anomalias implica uma análise completa do estado de conservação da Obra de Arte, registo detalhado das suas condições de

funcionamento, dos componentes existentes e das anomalias detetadas, por forma a conhecer as causas que lhes deram origem, efetuar uma estimativa da sua possível evolução e quais os métodos mais indicados por forma a proceder à sua reparação.

4 Inspeção, ensaios e avaliação do comportamento estrutural de pontes ferroviárias

4.1 Considerações iniciais

Durante algum tempo, pensou-se que as pontes durariam por tempo indeterminado, facto que ficou provado como não sendo verídico. Todas as pontes necessitam de manutenção para atingirem a vida útil para a qual foram projetadas, assim sendo, é necessário a realização de inspeções periódicas que permitam aferir o estado de conservação em que se encontram (V. Costa, Oliveira, & Varum, 2009).

A avaliação da segurança das pontes deve ser feita de forma faseada, possuindo níveis de complexidade superiores, apenas quando justificável (Cruz, Wisniewski, & Casas, 2008). Para tal, o *Joint Committe on Structural Safety* (Diamantidis, 2001), propõe uma abordagem de três etapas, sendo a primeira a inspeção visual, a segunda a realização de ensaios e a terceira a consulta de uma equipa especializada.

No capítulo anterior, procurou-se abordar os principais fatores de degradação em estruturas metálicas, bem como as principais anomalias por componente. Pretende-se agora apresentar as técnicas de inspeção e diagnóstico, nomeadamente, a inspeção visual e a inspeção com recurso a ensaios, particularizando para os ensaios não destrutivos, assim como fazer referência a algumas das estratégias de reparação e reforço aplicadas a estruturas metálicas, com o intuito de melhorar a sua segurança, resistência e durabilidade. As soluções de reparação e reforço apresentadas pretendem apenas ilustrar as técnicas mais comuns, não constituindo um estudo exaustivo, salvaguardando a ideia de que cada estrutura é um caso concreto. Além disto, tenciona-se demonstrar a importância da monitorização da integridade estrutural ao longo das várias fases da vida das Obras de Arte e particulariza-se para o caso das pontes ferroviárias em Portugal, destacando quatro exemplos que possuem ou já possuíram sistemas de monitorização.

4.2 Técnicas de inspeção e diagnóstico de estruturas

Ao longo da vida útil de uma estrutura surgem anomalias que aceleram a sua deterioração, sendo indispensável realizar campanhas de inspeção e diagnóstico às Obras de Arte, por forma aferir o estado de conservação dos seus componentes. Para tal, recorrem-se a inspeções visuais e ensaios complementares, que permitem ter uma maior certeza das causas associadas às anomalias encontradas, assim como o possível cenário de evolução de cada uma delas.

Ainda assim, em alguns casos, quando a abordagem do problema não é a mais adequada, tomando-se uma metodologia de diagnóstico incorreta, que conduz a intervenções desajustadas, ocultam sintomas, e podem até mesmo agravar as anomalias existentes (Pavão, 2016).

4.2.1 *Inspeção visual*

As técnicas de inspeção visual são muito utilizadas como ferramenta de diagnóstico, por permitirem aferir o estado de conservação da estrutura, identificar zonas inacessíveis ou componentes que necessitem de uma inspeção mais detalhada. Naturalmente, o diagnóstico de uma estrutura não se baseia apenas numa análise visual. Por forma a conferir um carácter fidedigno à avaliação, deve conjugar-se a análise visual com métodos auxiliares, como a realização de ensaios.

A inspeção visual (Figura 4.1a), consiste na identificação de todos os componentes de uma estrutura, das degradações existentes em cada um desses componentes e a estabilização ou não das anomalias detetadas. No caso específico das pontes ferroviárias, existe uma certa vantagem, na medida em que o maquinista do comboio pode ir relatando os danos que observe, ou detete através da audição, na via ferroviária.

De maneira a rentabilizar ao máximo a inspeção visual, é necessário efetuar algum trabalho prévio. Recorrendo ao sistema de gestão de Obras de Arte, o qual possui toda a informação relativa às estruturas, incluindo inspeções anteriores, deve procurar-se adquirir o máximo de informações, pois desta forma, é possível efetuar a inspeção total e detalhada de acordo com cada estrutura.

Uma vez concluída a análise do histórico relativo à Obra de Arte que se retende inspecionar, a equipa de inspeção decide qual o equipamento necessário a transportar. Os equipamentos mais comuns passam por:

- Equipamentos de proteção, como calçado de segurança, capacetes, luvas e arnês;
- Equipamento de sinalização, como coletes refletores;
- Equipamentos de medição, como fita métrica, régua de fendas, craveira, fio de prumo e medidor de distâncias laser;
- Equipamento ótico, como binóculos, lanternas e câmaras fotográficas;
- Equipamento auxiliar, como escadas, escovas de arame, trincha e martelo.

Para além dos equipamentos referidos, por vezes, são necessários outros equipamentos mais sofisticados, dependendo do meio em que a Obra de Arte se encontra inserida e dos acessos existentes, denominados por meios especiais de acesso. Os meios especiais de acesso podem ser barcos a motor ou plataformas elevatórias (Figura 4.1b).

Outro meio especial de acesso, trata-se do acesso por cordas (Figura 4.1c), o qual é usado preferencialmente face à dresine de inspeção, devido à necessidade de corte de via e tensão de catenária, obrigando a realização dos trabalhos em período noturno e necessariamente curto (usualmente entre as 00.00h e as 04.00h) (Lopes, 2012). O recurso a trabalhos com acesso por cordas resulta da necessidade de aceder a determinados locais da Obra de Arte, inacessíveis e outro modo. Contudo, associado a este tipo de trabalho, apesar de realizado por trabalhadores com formação especializada e de serem utilizados sistemas anti queda, os quais cumprem os requisitos legais e normativos em vigor, existe sempre o risco de queda em altura.



Figura 4.1 – Métodos de inspeção: a) Inspeção visual, b) Dresine de inspeção de pontes e c) Inspeção com acesso por cordas.

A inspeção visual, apesar de imprescindível, não é suficiente, pois não permite avaliar as anomalias em profundidade, correspondendo sempre a uma análise qualitativa em que a gravidade das anomalias é avaliada de forma empírica e os critérios de análise variam para cada equipa de inspeção. (V. Costa, 2009).

No que respeita à equipa de inspeção, a subjetividade da análise resulta da experiência de cada membro, da sua formação na área de pontes e de muitos outros fatores, como a sua personalidade, ou seja, se opta por fazer uma análise conservadora ou não, da sua acuidade visual, e do seu à vontade a trabalhar no meio do tráfego (Almeida, 2013).

4.2.2 Zonas inacessíveis para inspeção

Frequentemente, constata-se a existência de zonas inacessíveis em pontes de estrutura metálica. É de extrema importância referir que por si só, a inacessibilidade não constitui um problema, apenas passa a sê-lo quando se torna impossível detetar anomalias, por exemplo, no interior de peças fechadas. Tomando como exemplo as vigas caixão utilizadas nos tabuleiros das pontes, se o espaço interior ficar perfeitamente estanque, a formação de óxidos de ferro não progride, não existindo o aparecimento de corrosão.

No entanto, a inacessibilidade dificulta a deteção de anomalias que surjam no interior de espaços fechados e que não tenham qualquer reflexo a nível exterior. Por este motivo, devem evitar-se tornar inacessíveis componentes das estruturas essenciais à garantia da sua segurança.

Nas zonas cuja inspeção seja totalmente impossível devido à inacessibilidade, poderão ocorrer as mais variadas anomalias sem que seja possível detetá-las ou impedir o seu desenvolvimento. Esta é uma das limitações do trabalho de inspeção e manutenção das estruturas, sendo crucial o cuidado e preocupação na fase de projeto.

Nas estruturas em que se verifiquem componentes inacessíveis, será necessário efetuar uma inspeção mais completa e exaustiva, com recurso a meios especiais e mais equipas de inspeção do que as necessárias num caso dito regular.

4.2.3 Ensaios não destrutivos

A realização de ensaios nas estruturas é feita no âmbito das inspeções especiais, quando existe a necessidade de esclarecer alguma dúvida ou comprovar alguma hipótese. Os ensaios, além de ajudarem a encontrar respostas, também permitem detetar problemas

que ainda não são possíveis de detetar através da análise visual. Assim, a realização de ensaios não destrutivos em estruturas metálicas pode ajudar a melhorar a incerteza e subjetividade associada ao índice de avaria atribuído a cada estrutura (Li, Hsieh, & Lin, 2015). Distinguir os defeitos de fabrico do material, especificamente os de pintura, que podem permanecer inofensivos durante a vida útil da estrutura dos defeitos estruturais, que podem levar a estrutura à perda de funcionalidade, é de extrema importância. Muitos dos danos resultantes da degradação de estruturas metálicas são identificáveis através da análise visual, constituindo uma vantagem em relação a outros materiais (Perneta et al., 2010). Com o presente trabalho, não se pretende descrever exaustivamente os ensaios não destrutivos existentes para estruturas metálicas, apenas se apresentam na Tabela 4.1, alguns dos mais comuns, tendo em consideração as suas características e aplicabilidade.

Tabela 4.1 – Métodos não destrutivos aplicáveis a estruturas metálicas (adaptado de [Perneta et al., 2010]).

Ensaio	Princípio	Aplicação
Magnetoscopia	Magnetiza-se a superfície do aço e aplicam-se pequenas partículas de ferro fosforescentes. As partículas, são atraídas pela descontinuidade do campo magnético, identificando a fissura.	- Identificação de fissuras à superfície; - Verificação de furações após remoção de rebites e antes da aplicação de parafusos pré-esforçados; - Controlo de execução da técnica <i>stop hole</i> .
Líquidos penetrantes	Um líquido penetrante aplicado na superfície do material, é absorvido por capilaridade e permite revelar uma descontinuidade.	- Detecção de descontinuidades na superfície (fissuras, porosidade ou delaminação).
Radiografia	O elemento é irradiado com raios gama ou raios-X, e após penetração, os defeitos são apresentados como imagens acinzentadas num filme ou imagem do elemento.	- Detecção de fissuras à superfície e internas.
Ultrasons	Um feixe de energia acústica de elevada frequência é introduzida no material, sendo interrompida e refletida nas descontinuidades ou superfície do material.	- Detecção de descontinuidades, medir a espessura do material e medir a distância a uma descontinuidade (com exceção do ferro puddado).
Correntes de Eddy/Focault	Baeia-se nos princípios de indução eletromagnética. Os defeitos existentes são identificados quando as correntes elétricas induzidas são distorcidas.	- Detecção de fissuras nas furações após remoção de rebites e em elementos com fraca espessura; - Medição da espessura das camadas de revestimento; Detecção de danos por corrosão.
Emissão acústica	O movimento súbito de material sob tensão produz emissões acústicas que podem ser lidas através de sensores.	- Deformações do material; - Existência de fissuras em chapas sobrepostas e fissuras ativas em propagação.

Em determinados casos, quando se pretende conhecer as características de uma liga metálica ou avaliar a compatibilidade de sistemas de pintura e das pinturas existentes, torna-se necessário proceder a ensaios de carácter destrutivo. A avaliação do estado do sistema da proteção e superfície é de extrema importância na avaliação do tipo de intervenção de que o mesmo deverá ser objeto, quer seja um revestimento novo ou reparação localizada (Perneta et al., 2010).

4.3 Monitorização da integridade estrutural

A compreensão do comportamento das estruturas após a sua entrada em serviço sempre foi uma preocupação dos engenheiros civis. Todavia, devido às limitações existentes aquando o aparecimento das campanhas experimentais, a avaliação era essencialmente realizada recorrendo à inspeção visual, tornando as conclusões muito subjetivas.

A análise experimental das estruturas já é utilizada há várias décadas, através da medição de deslocamentos pontuais ou rotações de secções, tendo evoluído até aos dias de hoje, onde se transformou num ato contínuo, através da medição de várias grandezas em várias secções de referência (Bastos, 1997).

É neste contexto que surge o interesse pela monitorização da integridade estrutural, ou seja, a evolução do acompanhamento da integridade estrutural de um ato pontual para um ato contínuo.

A monitorização do comportamento de uma estrutura permite verificar teorias de comportamento estrutural admitidas no processo de modelação numérica, assim como a deteção precoce de eventuais anomalias. Resumidamente, consiste na recolha periódica e organizada de informação sobre as estruturas, e na análise sistemática da mesma. A principal utilidade da monitorização prende-se com a segurança. De facto, a deteção precoce de anomalias reduz o risco de colapso súbito, evitando, desta forma, a perda de vidas humanas e bens materiais. No caso de ocorrência de um evento extremo, como um sismo ou uma colisão entre um meio de transporte e um elemento estrutural, a informação recolhida através do sistema de monitorização permite antecipar e sustentar teorias sobre as possíveis consequências a nível estrutural e sobre as condições de segurança remanescentes (L. O. Santos, 2014).

4.3.1 *Conceito de monitorização da integridade estrutural – “Structural health monitoring”*

Não existe um consenso no que respeita à definição da monitorização da integridade estrutural (*SHM – Structural Health Monitoring*), a nível nacional e internacional. Segundo (Balageas, 2006), a monitorização da integridade estrutural consiste em fornecer, a cada momento da vida útil da estrutura, um diagnóstico sobre o “estado” dos materiais constituintes, dos diferentes componentes e do funcionamento da estrutura enquanto um todo. A observação das estruturas ao longo do tempo é efetuada de forma remota, através de medições estáticas e dinâmicas, graças a uma rede de sensores instalados nas estruturas e recorrendo a algoritmos de análise que permitem identificar danos estruturais devido a fatores como o envelhecimento, ações ambientais, ou ações acidentais, possibilitando assim, a realização de um prognóstico no que respeita à evolução dos danos, vida residual, entre outros. Pode dizer-se que a monitorização da integridade estrutural se trata de um modo novo e aprimorado de realizar uma avaliação não destrutiva.

De referir que existem outras definições, sendo esta apenas uma definição possível de entre as várias existentes.

4.3.2 *Ensaio dinâmico*

Atualmente, os ensaios dinâmicos são considerados uma ferramenta bastante útil para caracterizar o comportamento dinâmico de estruturas de engenharia civil, visando apoiar a decisão de implementação de modificações ou reparações aquando a deteção de danos, começando já a serem integrados nos sistemas de gestão de construção (Cunha et al., 2010).

Ao longo da vida útil das estruturas, utilizam-se modelos numéricos para avaliar o seu comportamento dinâmico, a partir dos quais é possível efetuar uma avaliação da segurança. Por vezes, podem existir dúvidas quanto à fiabilidade e adequabilidade dos referidos modelos numéricos para simular determinadas realidades físicas, recorrendo-se à realização de ensaios dinâmicos para calibrar e validar os modelos (Mendes, 2010).

Existem dois objetivos no que respeita à execução de ensaios dinâmicos, diferindo entre estruturas novas e estruturas antigas. Nas estruturas novas, utilizam-se para caracterizar parâmetros modais, tais como, frequências naturais, modos de vibração e amortecimentos modais, com o intuito de avaliar a conformidade dos modelos de projeto e estimar as

repercussões de erros construtivos, designando-se por ensaios de receção. Em estruturas antigas, utilizam-se para avaliar os parâmetros da resposta a ações estáticas e dinâmicas, como por exemplo, o estado de deterioração ou estimar as condições de serviço estrutural.

É possível distinguir três tipos de ensaios *in situ* para caracterizar dinamicamente as estruturas: ensaios de vibração forçada, ensaios de vibração livre e ensaios de vibração ambiental. A escolha do tipo de ensaio a realizar deve ter por base o objetivo pretendido, os equipamentos necessários, os custos associados e a caracterização experimental pretendida (Mendes & Oliveira, 2008).

4.3.2.1 Ensaio de vibração forçada

Dos três tipos de ensaios de vibração referidos, sempre que seja necessário recorrer a um método mais direto e preciso, utilizam-se os ensaios de vibração forçada.

Este tipo de ensaio consiste na aplicação de uma excitação à estrutura (aleatória, transitória ou harmónica), num ou vários pontos e na respetiva medição da resposta, normalmente em acelerações. Geralmente, a excitação é imposta recorrendo a excitadores de massa excêntrica, excitadores servo-hidráulicos, excitadores eletrodinâmicos e martelo de impulsos. Na Figura 4.2 apresenta-se um excitador de massa excêntrica, usualmente utilizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).



Figura 4.2 – Excitador rotativo de massa excêntrica com motor elétrico (LNEC).

A análise dos resultados obtidos fundamenta-se na correlação da excitação aplicada com a resposta medida, através das funções de resposta em frequência (FRF), por exemplo, a partir das quais se torna possível obter estimativas de frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento modais.

No entanto, a este tipo de ensaios está associado um elevado custo, pelo que se realizam com longos intervalos de tempo, não permitindo obter grandes quantidades de informação experimental sobre as propriedades dinâmicas das estruturas em estudo (Mendes, 2012).

4.3.2.2 Ensaio de vibração livre

Os ensaios de vibração livre consistem na imposição de um deslocamento inicial à estrutura e na libertação repentina, deixando-a vibrar em regime livre. Este ensaio recorre à libertação súbita de uma massa suspensa ou do corte de uma barra tracionada, contrariamente ao que acontece nos ensaios de vibração forçada, em que a excitação é aplicada pela imposição de forças (Cunha et al., 2010).

O objetivo deste tipo de ensaio é impor vibrações na estrutura com amplitudes superiores, relativamente à vibração ambiental, permitindo assim uma melhoria no que respeita à determinação dos coeficientes de amortecimento associados a cada modo de vibração.

Na Figura 4.3 encontra-se representado o ensaio de receção realizado na Ponte Internacional do Guadiana e na estrutura de ampliação da pista do Aeroporto Internacional da Madeira, em que foi utilizada uma massa de 600 kN suspensa do tabuleiro através de cabos de pré-esforço (L. O. Santos, 2014).

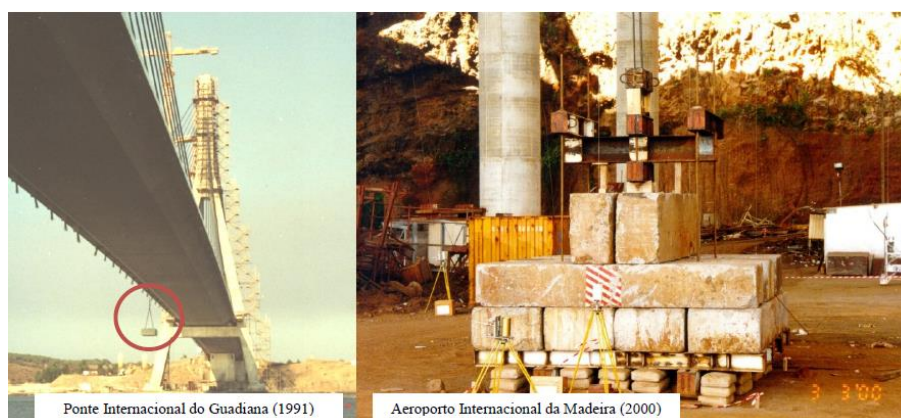


Figura 4.3 – Ensaio de vibração em regime livre: a) Ponte Internacional do Guadiana (1991) e b) Aeroporto Internacional da Madeira (2000) (adaptado de [L. O. Santos, 2014]).

4.3.2.3 Ensaio de vibração ambiental

Os ensaios de vibração ambiental consistem na medição da resposta das estruturas em aceleração, às ações a que estão normalmente sujeitas, tais como o vento, o tráfego, ou sismos de baixa intensidade, para identificar os parâmetros modais, ou seja, frequências naturais, modos de vibração e amortecimentos modais.

Contrariamente aos ensaios referidos anteriormente, o ensaio de vibração ambiental pode ser executado sem a obrigação da interrupção do funcionamento da estrutura, uma vez que são as próprias ações decorrentes do seu funcionamento que constituem as fontes de excitação dinâmica que induzem as respostas que são medidas (J. Rodrigues, 2004).

Graças à qualidade dos resultados proporcionados e à facilidade de execução, uma vez que não é necessária a mobilização de meios pesados nem estipulação de restrições no tráfego, os ensaios dinâmicos realizados são maioritariamente deste tipo. Contudo, as amplitudes de resposta da estrutura são muito baixas, o que constitui uma desvantagem, pois torna-se necessário utilizar equipamentos de medição de resposta com elevada sensibilidade (L. O. Santos, 2014), além de não permitir a obtenção de forma exata dos coeficientes de amortecimento.

4.3.3 Monitorização estrutural ao longo das várias fases das Obras de Arte

A monitorização estrutural deve estar presente ao longo das diversas fases da vida de uma obra, especialmente nas que tenham maior dimensão ou grau de complexidade. Consoante a fase da vida que se pretenda monitorizar, o grau de especificidade das informações ou grandezas a obter difere. Posto isto, podem distinguir-se as seguintes fases da vida ao nível da monitorização, sendo elas, a fase de projeto e execução, a fase de aferição do comportamento estrutural e conformidade com o projeto, a fase de exploração da Obra de Arte e a fase de reparação da estrutura (durante e após).

De modo a obter o maior nível de sucesso possível, devem ser estabelecidas ao nível da fase de projeto, quais as grandezas a medir, as secções instrumentadas, o número de sensores aplicados e a frequência das medições. Nesta fase existem, essencialmente, dois interesses, conhecer o comportamento das secções críticas da estrutura ao nível das deformações que possam vir a sofrer e caracterizar o comportamento global da estrutura. Estas informações constituem uma mais valia, na medida em que permitem confirmar ou ajustar as hipóteses de cálculo adotadas.

Após a conclusão da obra e antes da entrada em exploração, é frequente a realização de ensaios de carga para avaliação da conformidade. Nesta fase, é efetuada uma comparação entre as grandezas medidas e as previstas no modelo numérico desenvolvido.

Ao longo do período de vida útil da estrutura, a monitorização contínua acompanhada de inspeções visuais periódicas pode ser bastante vantajosa, na medida em que permite um acompanhamento da evolução da resposta estrutural às ações de tráfego e ambientais.

No caso particular dos sistemas estruturais de maior complexidade, podem ser integrados sistemas de vigilância. Desta forma, através de um conjunto de sensores com capacidade de detetar ações extraordinárias sobre a estrutura, tais como sobrecargas excessivas,

sismos ou ventos de elevada intensidade, é desencadeado um processo de aquisição de dados com maior frequência (Félix, 2004).

A instalação de um sistema de monitorização, além de servir como base ao estudo do comportamento real das estruturas, é uma ferramenta bastante valiosa no processo de decisão ao nível da gestão de pontes, quer em termos de processos de manutenção, reabilitação ou substituição, na medida em que permite avaliar a eficiência das soluções adotadas (Farthey, 2005).

4.3.4 Monitorização de pontes ferroviárias em Portugal e no mundo

Em Portugal, no que respeita à temática da monitorização estrutural em pontes ferroviárias, merecem referência os estudos efetuados na ponte da Arrábida (Marecos, 1963) e na ponte 25 de Abril (Marecos et al., 1969).

Atualmente, destacam-se várias instituições de referência a nível nacional e internacional, no que respeita à temática da monitorização estrutural. A nível internacional, salienta-se a universidade da Califórnia, especificamente, o Departamento de Estruturas de Engenharia Civil de San Diego, na área de monitorização e no desenvolvimento de algoritmos para apoio à tomada de decisão.

A nível nacional, distinguem-se o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) e a FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). O LNEC, pioneiro no que respeita à monitorização estrutural, encontra-se envolvido nesta atividade desde 1946. Os seus primeiros trabalhos dentro desta área foram apresentados a nível internacional por (Rocha et al., 1955) e são referentes à observação de uma ponte em arco sobre o rio Sousa, da ponte de Santa Clara, em Coimbra, e da ponte de Vala Nova (L. O. Santos, 2014). A FEUP destaca-se na área da monitorização pelo trabalho efetuado na ponte D. Luís I e na ponte metálica do Pinhão, ambas sobre o rio Douro, entre outras.

Relativamente ao tema central deste trabalho, é possível destacar quatro exemplos de pontes ferroviárias em Portugal, que possuem ou já possuíram sistemas de monitorização, os quais se apresentam de seguida.

4.3.4.1 Ponte do Lima

O primeiro exemplo que se apresenta refere-se à Ponte do Lima, uma ponte centenária que se encontra inserida na linha do Minho, em Viana do Castelo. É constituída por 10 tramos contínuos de estrutura metálica em viga de rótula múltipla, com um tabuleiro

para trânsito rodoviário (superior) e outro para trânsito ferroviário (inferior), tal como se pode observar na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Vista geral da Ponte do Lima, inserida ao Pk 080,057 da Linha do Minho.

Em 2007, esta Obra de Arte foi alvo de uma ação de reabilitação e reforço estrutural, tendo sido substituído e alargado o tabuleiro rodoviário e reforçadas as cordas superiores das duas treliças principais. Por solicitação do projetista e do empreiteiro, a ponte foi alvo de várias campanhas de monitorização, no decorrer da intervenção, por forma a aferir o seu comportamento estrutural (C. Rodrigues et al., 2013).

A monitorização estrutural, de curta duração, cobriu quatro fases do processo de reabilitação. Numa primeira fase, visou identificar o comportamento inicial da estrutura antes da aplicação do reforço, na segunda fase, visou a avaliação do processo construtivo com as obras em curso, na terceira fase, pretendia analisar o comportamento final da estrutura reforçada durante um ensaio de carga e na última fase, tinha em vista efetuar um diagnóstico para uma posterior reparação do piso rodoviário (C. Rodrigues et al., 2012).

Dadas as condicionantes, optou-se por uma instrumentação em fibra ótica, tendo-se efetuado a medição das extensões mecânicas e perfis de extensão em barras críticas da estrutura (C. Rodrigues et al., 2013). Na Figura 4.5 encontra-se representada a localização das secções instrumentadas, para a terceira fase de estudo.

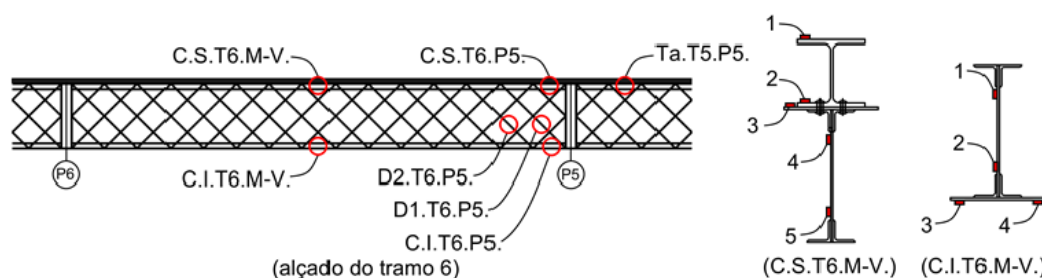


Figura 4.5 – Localização esquemática das secções instrumentadas na Ponte do Lima, durante a terceira fase (adaptado de [C. Rodrigues et al., 2013]).

4.3.4.2 Ponte de São João

A Ponte de São João está inserida na linha do Norte, no Porto. Trata-se de uma ponte ferroviária, constituída por betão armado pré-esforçado (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Vista geral da Ponte de São João, inserida ao Pk 334,542 da Linha do Norte.

A estrutura projetada pelo Prof. Edgar Cardoso e construída pelo consórcio FERDOURO-ACE, possui uma extensão total de 1028,8 m (Cardoso, 1984) e é contínua com os viadutos de acesso. A plataforma ferroviária (Figura 4.7), é constituída por laje de via, sem travessas e sem balastro.

A ponte está classificada na categoria D4 de UIC – *International Union of Railways*, a qual permite uma velocidade de circulação máxima de 120 km/h (Min et al., 2017).



Figura 4.7 – Vista da plataforma ferroviária da Ponte de São João.

Durante a fase de construção da ponte, procedeu-se à instrumentação da mesma com um sistema de monitorização permanente, o qual engloba diferentes tipos de sensores. O principal objetivo para a implementação do sistema de monitorização foi a caracterização experimental do seu comportamento estrutural estático (Min et al., 2016).

Numa fase inicial, a observação do comportamento estrutural envolveu a medição de extensões e temperaturas em várias secções da estrutura: 10 secções no tabuleiro e 4 secções nos dois pilares principais, tal como se pode verificar através da Figura 4.8. Na base e no topo dos pilares, foram instaladas bases de clinómetro de bolha de ar (Min et al., 2017).

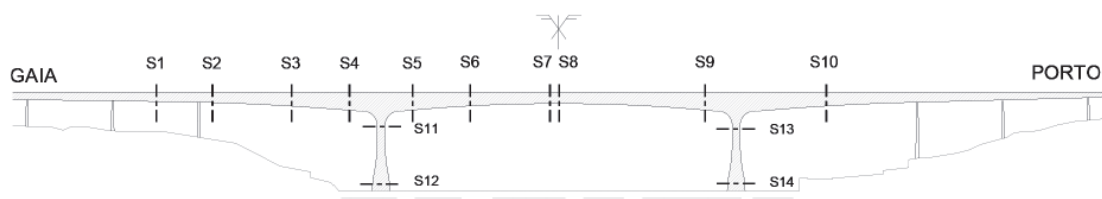


Figura 4.8 – Localização das secções instrumentadas na Ponte de São João (adaptado de [Min et al., 2017]).

Durante o ano de 2007, foi efetuada a modernização da instrumentação efetuada, com o intuito de automatizar as medições, o acesso remoto aos dados e o seu processamento em tempo real (Min et al., 2016).

Em 2014, instalou-se um sistema de monitorização dinâmica permanente, através do qual são registadas acelerações transversais e verticais do tabuleiro. Os dados obtidos, são processados em tempo real para obter as características dinâmicas da estrutura (Min et al., 2016).

4.3.4.3 Ponte do Tua

A ponte ferroviária do Tua (Figura 4.9a), encontra-se inserida na linha do Douro, em Vila Real. Constituída por uma estrutura metálica rebitada, com seis tramos apoiados em cinco pilares e dois encontros, ambos constituídos por alvenaria de pedra de granito. A estrutura de suporte ao tabuleiro, é composta por duas vigas principais longitudinais do tipo rótula múltipla que fornecem apoio ao tabuleiro, constituído por Longarina-Carlinga (Figura 4.9b).



Figura 4.9 - Ponte ferroviária do Tua: a) Vista geral e b) Vista da face inferior do tabuleiro.

A ponte foi alvo de um reforço das fundações dos pilares, integrado na recente construção do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz-Tua. Por esse motivo, o Laboratório de Vibrações e Monitorização da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (ViBest/FEUP), procedeu à implementação e acompanhamento de um sistema de

monitorização da ponte ferroviária sobre o rio Tua, o qual se pode observar na Figura 4.10. Este sistema, é constituído por três subsistemas: o primeiro, baseia-se em acelerómetros colocados no tabuleiro e no topo dos pilares, e tem por objetivo principal a monitorização da condição estrutural da Obra de Arte, o segundo subsistema, baseia-se em geofones triaxiais instalados nos encontros e nas bases dos pilares, com o intuito de monitorizar as vibrações induzidas pelas atividades de construção e finalmente, o terceiro subsistema, consiste na instalação de clinómetros bi-axiais no topo dos três pilares fundados no leito do rio, para caracterizar eventuais rotações que possam ocorrer (Pacheco, 2016).



Figura 4.10 – Sistema de monitorização instalado na ponte ferroviária sobre o rio Tua.

4.3.4.4 Ponte de Trezói

A ponte ferroviária de Trezói (Figura 4.11a), encontra-se inserida na linha da Beira Alta, em Viseu. É constituída por uma estrutura metálica rebitada, com três tramos apoiados em dois pilares, os quais possuem uma estrutura metálica treliçada de configuração trapezoidal e por dois encontros em alvenaria de pedra. A estrutura de suporte ao tabuleiro, é composta por duas vigas principais longitudinais do tipo Warren Reta que dão apoio ao tabuleiro, constituído por Longarina-Carlinga (Figura 4.11b). Assim, as vigas principais dão apoio às carlingas, sobre as quais se apoiam as longarinas que suportam diretamente os carris.



a)



b)

Figura 4.11 – Ponte ferroviária de Trezói: a) Vista geral e b) Vista da face inferior do tabuleiro.

O sistema de monitorização implementado na ponte, teve como principal objetivo a realização de ensaios dinâmicos à passagem das circulações, para traçar níveis de tensões em elementos críticos da estrutura, tendo em vista a definição da vida útil e fadiga. Na secção de meio vão do tramo central, instalaram-se lado a lado sensores óticos e elétricos, com o intuito de efetuar uma comparação do desempenho na aquisição dinâmica dos dois tipos de sensores de deformação (Figueiras, 2008).

4.3.5 Componentes de um sistema de monitorização estrutural

Os sistemas de monitorização estrutural podem ser aplicados aos mais variados tipos de estruturas, desde edifícios, pontes, túneis e barragens.

Numa tentativa de clarificar as diversas partes constituintes de um sistema de monitorização, dividiu-se o mesmo em seis componentes, tal como esquematizado na Figura 4.12.

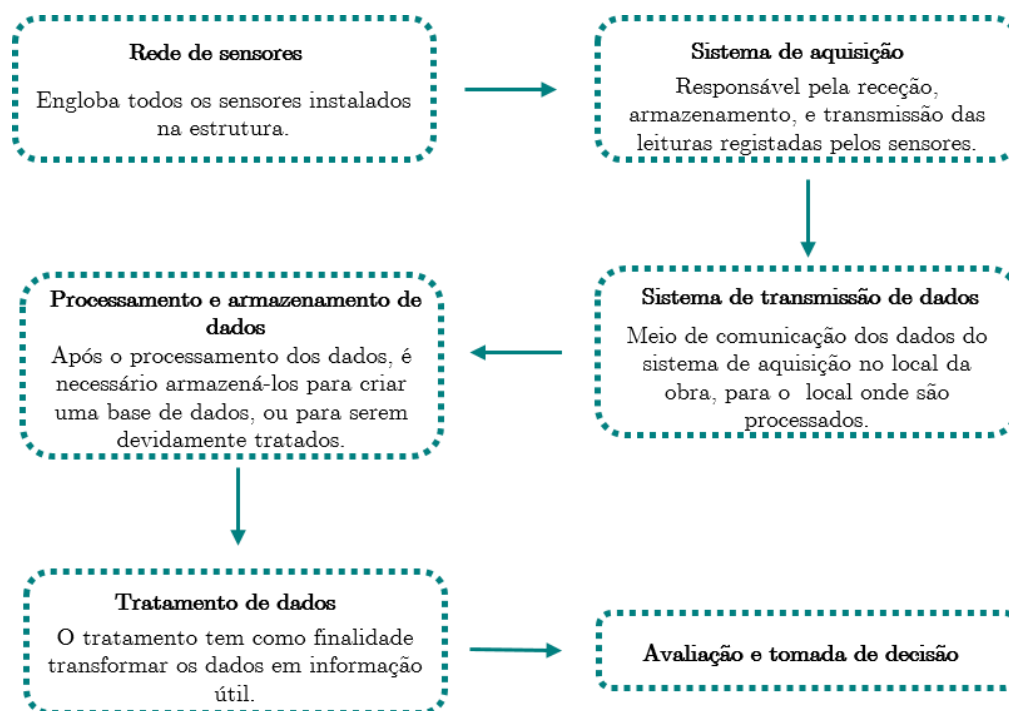


Figura 4.12 – Subconjuntos de um sistema típico de monitorização da integridade estrutural.

4.3.5.1 Vantagens de um sistema de monitorização

A observação e monitorização do comportamento estrutural, assumem particular importância em obras de maior dimensão, em sistemas estruturais complexos e aquando da ocorrência de danos com prejuízos severos para as estruturas. De seguida, apresentam-

se algumas vantagens inerentes a estes sistemas, de um ponto de vista estrutural e económico:

- Monitorização e diagnóstico em tempo real;
- Detecção de avarias e prevenção atempada de situações de colapso, aumentando o tempo de vida útil da Obra de Arte;
- Acompanhamento da evolução das grandezas relevantes ao longo de todas as fases da sua vida, desde a fase de construção, até ao final do período de exploração;
- Redução dos erros humanos associados à avaliação visual da condição estrutural;
- Fornece dados essenciais para a tomada de decisão relativa a trabalhos de reabilitação ou substituição;
- Após a realização de uma intervenção mais ou menos profunda, a monitorização pode revelar-se útil, no sentido de avaliar a eficiência das soluções adotadas e para aferir o comportamento da estrutura;
- Permite calibrar modelos numéricos de análise estrutural.

4.3.5.2 Dificuldades na aplicação de um sistema de monitorização

Pelo facto de serem dispendiosos, os sistemas de monitorização apenas se tornarão adotados pelos donos de obra e pelos projetistas, caso sejam claramente benéficos para a manutenção das estruturas, ao invés de apenas fornecerem uma quantidade enorme e permanente de dados. Isto é, o processamento automático e em tempo real da informação proveniente da rede de sensores aplicados na estrutura, deverá ser apoiada por computadores e *softwares* capazes de filtrar a informação relevante, por forma a torná-la clara para o utilizador (Figueiredo, 2006).

4.4 Estratégias de reparação e reforço de estruturas metálicas

Para que uma estrutura mantenha a integridade ao longo da sua vida útil, são necessárias estratégias de conservação, reparação e reforço. A Figura 4.13 pretende evidenciar a importância da intervenção ao longo da vida útil, quer seja preventiva, quando a integridade estrutural se encontra acima do limite de segurança mínimo, ou essencial, quando a integridade estrutural ultrapassa o limite mínimo de segurança.

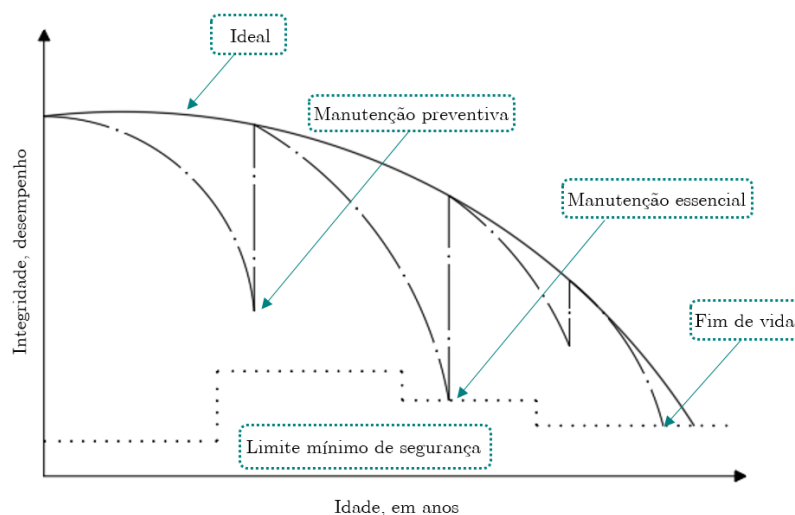


Figura 4.13 – Soluções de manutenção ao longo da vida útil (adaptado de [Santa & Bergmeister, 2000]).

O formato convexo da curva, representa o processo de deterioração ao qual as estruturas são submetidas ao longo do tempo. Tal como se pode verificar, as Obras de Arte que são submetidas a ações de reparação ou reforço ao longo da sua vida útil, sofrem um incremento no seu tempo de vida e nível de segurança. Evidentemente que estas ações de reparação e reforço só são eficazes até um determinado período da vida de uma estrutura, ou seja, a partir do momento em que se ultrapassa o nível mínimo de segurança aceitável, torna-se impossível repor o estado inicial das tensões na estrutura, atingindo-se o fim da vida.

Considerando uma estrutura que se encontra dentro do seu período de vida útil, uma vez analisada e tendo por base as solicitações a que se encontra sujeita, é avaliada a necessidade de intervir, e qual a melhor estratégia de reabilitação a adotar. Um cenário de intervenção ou reforço pode dividir-se em global ou local. Tal justifica-se, porque existem elementos que podem ser encarados de forma isolada no que respeita ao cálculo estrutural, tais como longarinas ou carlingas, por outro lado, existem elementos que são objeto de um estudo de reforço global, com é o caso das vigas principais quando a solução de reforço se trate, por exemplo, da colocação de pré-esforço externo (N. Santos, 1998).

Independentemente de se tratar de uma situação de reforço local ou global, existem determinados fatores que podem condicionar a escolha da solução (N. Santos, 1998):

- Fatores económicos, sempre presentes ao longo do estudo, desempenham um papel fundamental de decisão;

- A estética da estrutura deve ser mantida, dentro do possível. Este é um dos pontos mais importantes, pois permite preservar o valor arquitetónico da Obra de Arte, sem provocar impactos ambientais negativos;
- As implicações que a intervenção acarreta, no que respeita à interrupção de tráfego, a qual muitas vezes pode não ser possível, conduzindo a um planeamento minucioso do processo de intervenção;
- A exequibilidade da solução escolhida, o modo de execução, os equipamentos necessários, as consequências para a estrutura, etc. devem ser cuidadosamente ponderados e analisados;
- Um planeamento de intervenção eficaz com etapas bem definidas, por forma a garantir a eficácia do processo de reabilitação e evitar gastos adicionais;
- A instrumentação da obra, com o intuito de avaliar o seu comportamento após a intervenção e avaliar a eficácia, tanto da solução escolhida, como dos modelos numéricos de cálculo desenvolvidos.

Nos pontos seguintes, apresentam-se algumas soluções estruturais mais comuns para pontes metálicas ferroviárias. Não obstante, em virtude das anomalias verificadas, a reabilitação e reforço de uma ponte apenas estará completa tendo em atenção todos os componentes principais, tais como encontros, pilares ou aparelhos de apoio. Aliás, algumas soluções estruturais têm implicações diretas sobre os elementos referidos, o que conduz à necessidade de se intervir sobre os mesmos, por forma a garantir o bom funcionamento global da estrutura. De realçar que cada obra deve ser analisada individualmente, de modo a optar pela solução mais adequada às suas necessidades e condicionamentos.

Por se tratar de um assunto extenso, optou-se por se direccionar o foco do trabalho apenas para as soluções de reforço mais comuns, a nível global da estrutura, para as ligações rebitadas e aparafusadas, e para a proteção de superfície.

4.4.1 Aumento da capacidade de carga

Uma solução bastante comum, que tem vindo a contornar o problema da falta de capacidade resistente global nas estruturas, prende-se com a utilização de cabos e pré-esforço exterior.

Um exemplo para este tipo de solução trata-se da Ponte do Lima, na linha do Minho (Figura 4.14).



Figura 4.14 - Reforço por aplicação de pré-esforço exterior: Ponte do Lima.

Neste caso, a técnica consistiu na colocação de um conjunto de cabos pelo exterior das vigas principais, ligados a uma estrutura de suporte secundária, constituída por grelhas de perfis metálicos (carlingas), colocada entre pilares, por baixo do tabuleiro inferior, conferindo, assim, novas zonas de apoio à estrutura (Figura 4.15). Desta forma, as cargas transmitidas às grelhas, são por sua vez transmitidas aos cabos que percorrem toda a estrutura. Normalmente, os cabos encontram-se ancorados a maciços na proximidade dos encontros (Figura 4.16), o que pode originar algumas fissuras nestes elementos (N. Santos, 1998).

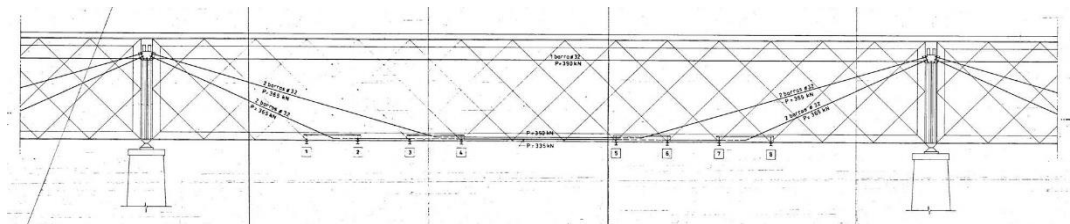


Figura 4.15 – Excerto das peças desenhadas do projeto de aplicação do pré-esforço exterior: alçado de um tramo intermédio da Ponte do Lima (Martins, 1992).



Figura 4.16 –Passagem dos cabos pelas alvenarias, na Ponte do Lima.

Pelo facto de se tratar de uma solução visível ao longo da estrutura, dada a dimensão dos cabos, existem algumas reservas quanto a esta técnica, no que respeita ao resultado estético.

4.4.2 Adição de perfis comerciais ou novas chapas

Em diversas situações, o reforço poderá ser realizado através do aumento da secção dos elementos danificados, com a adição de perfis comerciais ou novas chapas. Tome-se por exemplo, o caso de um perfil composto em que existe excentricidade dos eixos da rótula, e a alma sai do seu plano, conforme esquematizado na Figura 4.17. De acordo com Gil (1979), perante esta situação, a deformação das almas do perfil composto poderia ser impedida ou reparada, através da colocação de cantoneiras nas extremidades das almas, ligadas por réguas metálicas, por exemplo, tal como ilustrado na Figura 4.18.

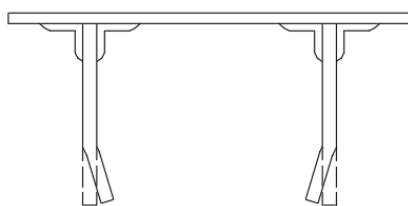


Figura 4.17 – Deslocamento das almas de um perfil composto para fora do seu plano (secção transversal) (adaptado de [Gil, 1979]).

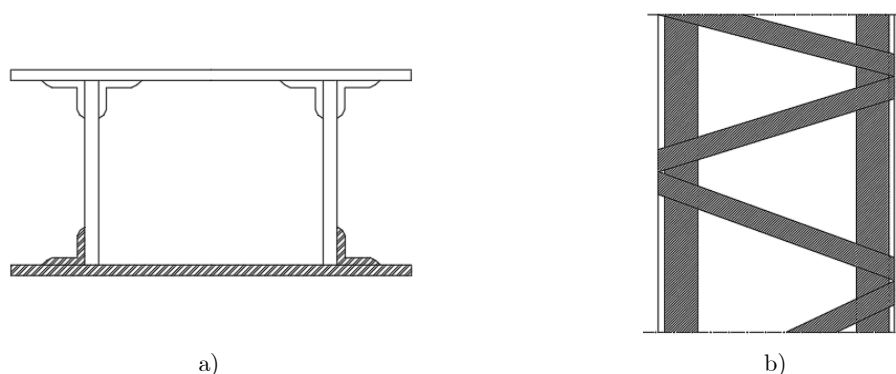


Figura 4.18 – Solução de reforço com adição de novas cantoneiras e réguas metálicas: a) Seção transversal e b) Vista inferior (adaptado de [Gil, 1979]).

4.4.3 Reforço e substituição de elementos

Quando os elementos estruturais que constituem uma ponte metálica apresentam resistência insuficiente, a solução mais evidente, porém mais dispendiosa e de difícil execução, passa pela substituição desses mesmos elementos por outros novos. Assim sendo, a substituição de elementos deve passar por uma análise de viabilidade económica, de exequibilidade e das consequências para a circulação.

Na realidade, esta solução apenas é aceitável para alguns elementos, como contraventamentos de algumas peças ou cantoneiras, dada a sua fácil execução, o tipo de ligação entre elementos, ou a importância estrutural.

A substituição de qualquer elemento de uma ponte, requer cuidados especiais, na medida em que na maioria dos casos das pontes ferroviárias, não é possível interromper a circulação. Assim, a substituição das peças deve ser rápida e garantir o funcionamento normal da estrutura durante o período de funcionamento.

4.4.4 Substituição de ligações

Existem diferentes tipos de ligações entre elementos metálicos, as quais apresentam um funcionamento distinto. As ligações rebitadas, funcionam predominantemente ao corte, as ligações aparafusadas garantem um funcionamento por atrito, ou seja, a compressão que se gera entre as peças ligadas origina um atrito responsável pela transmissão de forças na ligação, e a soldadura constitui uma ligação de continuidade entre elementos.

De um modo geral, os rebites são os responsáveis pela ligação de todos os elementos estruturais de uma ponte metálica. Por conseguinte, aquando da inspeção periódica, é necessário verificar se se encontram bem apertados, ou “leves”. Um rebite que se encontre “leve”, está fora de serviço, provocando esforços adicionais nos que se encontram ao seu redor, e conduzindo-os a ficarem “leves” também. Por este motivo, é de elevada importância a verificação periódica dos rebites, e caso apresentem o problema referido, efetuar a sua substituição por outros novos, ou por parafusos de alta resistência com aperto controlado, quando o posicionamento dos rebites dificulte a sua substituição, devido ao reduzido espaço para manobra dos equipamentos.

No que concerne às ligações soldadas, salienta-se que é raro encontrar um aço antigo cuja soldabilidade seja equivalente à dos aços utilizados atualmente.

4.4.5 Redução de vibrações

A verificação da aceleração vertical do tabuleiro de uma ponte, permite efetuar uma avaliação sobre o grau de severidade das vibrações induzidas aquando a passagem das circulações.

Apesar de fáceis de detetar, o problema das vibrações excessivas é de difícil resolução, pois é necessário alterar a rigidez ou inércia global da estrutura. Tomando como exemplo uma ponte metálica com este problema, uma solução possível seria aumentar a rigidez do sistema de contraventamento na direção segundo a qual se pretende diminuir as vibrações.

4.4.6 Proteção de superfície

Tal como se pode aferir, através das soluções de reparação e reforço apresentadas anteriormente, a maioria passa pelo reforço da estrutura, recorrendo à substituição de elementos, ou a um aumento das suas características resistentes. Não obstante, existem outros problemas que podem ser eliminados efetuando a manutenção corrente da proteção de superfície da Obra de Arte.

O processo de oxidação dos aços é bastante comum, passando a solução principal pela pintura periódica com produtos apropriados. Esta, deve ser aplicada após a limpeza superficial dos elementos afetados, caso o nível de oxidação não seja muito elevado, ou uma limpeza mais profunda, com picadeiras, raspadeiras e escovas de aço. Após a obtenção da superfície lisa, bem limpa e bem seca, deve então proceder-se à pintura. Destaca-se a importância de um tempo seco para a execução deste tipo de trabalho, pois quando exposto ao ar, o ferro oxida rapidamente, de uma forma diretamente proporcional ao grau de polimento e à humidade do ar.

4.5 Considerações finais

Ao longo deste capítulo foi abordada a temática da inspeção e diagnóstico das Obras de Arte. Numa primeira etapa, descreveu-se a técnica de inspeção visual, sendo esta a mais utilizada como ferramenta de diagnóstico, pelo facto de permitir aferir o estado de conservação das estruturas, identificar as zonas inacessíveis ou os componentes que necessitem de uma inspeção mais aprofundada. Naturalmente, esta técnica deve ser conjugada com a realização de ensaios, caso seja necessário comprovar alguma hipótese, esclarecer algumas dúvidas, ou detetar outras anomalias que não seriam detetáveis utilizando apenas a inspeção visual. Por se tratar de um assunto extenso, tratado amplamente em vasta bibliografia, optou-se por direccionar o foco do trabalho apenas para ensaios não destrutivos.

Posteriormente, abordou-se a temática da monitorização da integridade estrutural e sublinha-se a sua importância ao longo das várias fases da vida de uma estrutura, principalmente em obras de grande dimensão ou grau de complexidade estrutural superior. Apresentaram-se ainda quatro exemplos de pontes ferroviárias em Portugal, que possuem ou já possuíram sistemas de monitorização.

Finalmente, referiram-se estratégias de reparação e reforço para o caso específico das estruturas metálicas, direccionando-se o foco para as soluções mais comuns, a nível global

da estrutura, para o tipo de ligações utilizadas e para a proteção de superfície. Pelo facto de cada Obra de Arte carecer de uma análise particular, não se apresentam soluções específicas para os aparelhos de apoio.

5 Estudo de caso

O capítulo 5 contém informação confidencial e reservada pela IP – Infraestruturas de Portugal, SA, tendo sido analisada exclusivamente pela aluna, pelo seu orientador e pelo júri, no âmbito da respetiva dissertação. O acesso ou consulta desta documentação por terceiros está sujeita a autorização expressa e prévia da IP – Infraestruturas de Portugal, SA.

6 Conclusões e perspectivas futuras

6.1 Principais conclusões

A presente dissertação foi realizada com base na consulta de diversos elementos bibliográficos e na experiência profissional da autora na área de inspeção e diagnóstico de estruturas especiais da IP, sendo o foco do trabalho direcionado para inspeções principais a pontes ferroviárias de estrutura metálica.

Primeiramente, abordaram-se as principais tipologias e sistemas estruturais mais comuns, nomeadamente, as pontes em viga, as pontes em arco e as pontes de cabos. De seguida, efetuou-se uma descrição pormenorizada dos principais componentes que constituem as pontes ferroviárias, recorrendo sempre a exemplos reais que ilustrem de forma clara e objetiva os referidos componentes.

Evidenciou-se a importância da implementação dos sistemas de gestão de Obras de Arte, constituindo uma base de dados que contém informação relativa a todas as inspeções, projetos e intervenções, permitindo, desta forma, obter uma visão global sobre o estado de conservação das pontes e efetuar uma estimativa do custo de manutenção, conservação ou reabilitação.

Apresentaram-se os diferentes tipos de anomalias mais comuns, que se observam nas pontes ferroviárias de estrutura metálica, assim como as causas que estão na sua origem. Alerta-se para o facto de que a identificação das causas prováveis associadas ao aparecimento de determinadas anomalias, é fundamental para a tomada de decisão quanto ao método de reparação que mais se adequa a cada caso.

Procurou-se, de um modo geral, apresentar as estratégias de reparação e reforço para pontes metálicas, direcionando-se o foco para as soluções mais comuns a nível global, especialmente no que toca ao reforço e substituição de elementos degradados, substituição de ligações e manutenção da proteção de superfície.

Ao longo da vida útil de uma estrutura, é necessário realizar campanhas de inspeção e diagnóstico periódicas, por forma a aferir o estado de conservação dos componentes. Para isso, recorrem-se a técnicas de inspeção visual aliadas à realização de ensaios complementares, que permitem detetar problemas não detetáveis de outro modo, assim como comprovar diagnósticos ou aferir a evolução das anomalias identificadas.

Mostrou-se que a monitorização estrutural possui um papel de grande importância no estudo do comportamento das estruturas, por este motivo, deve estar presente ao longo das várias fases da vida das obras, diferindo o grau de especificidade das informações ou grandezas a medir em função da fase da vida que se pretenda monitorizar. A crescente utilização destes sistemas, conjuntamente com a inspeção visual de elementos, poderá ser bastante vantajosa, na medida em que permite um acompanhamento contínuo da resposta às várias ações a que a estrutura se encontra sujeita.

Por vezes, dependendo do meio em que a Obra de Arte se encontre inserida, são necessários meios especiais de acesso, os quais podem ser barcos a motor, plataformas elevatórias ou o acesso por cordas. Este último, possui a desvantagem do risco de queda em altura, apesar de ser realizado apenas por trabalhadores com formação específica e utilizados sistemas anti queda.

O caso de estudo da ponte do Tejo, apresentado nesta dissertação, pretende demonstrar a importância e a necessidade de observação e monitorização deste tipo de estruturas.

Tendo por base a última inspeção principal global realizada à estrutura e a inspeção subaquática, conclui-se que a estrutura apresenta anomalias que podem comprometer a durabilidade. Por este motivo, apresentaram-se algumas propostas de trabalhos corretivos, que permitam repor o nível adequado de integridade estrutural.

6.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Na área de inspeção, diagnóstico e manutenção de pontes ferroviárias, apesar dos evidentes progressos ao longo dos últimos anos, há ainda alguns aspetos que poderão ser objeto de futuros desenvolvimentos, tais como:

- Desenvolvimento de documentos técnicos que contemplem estudos comparativos entre a progressão de anomalias em estruturas antigas, com o intuito de elaborar recomendações específicas para a sua preservação.
- Elaboração de manuais que permitam correlacionar anomalias e suas causas em função da tipologia, do sistema estrutural, da época de construção e do ambiente

em que se insere a Obra de Arte, no sentido de se obterem padrões comuns para estruturas idênticas, de modo a promover ações de manutenção preventivas e mitigar ações onerosas.

- Desenvolvimento de modelos de previsão para a evolução das anomalias detetadas, com base nos resultados obtidos através das inspeções e dos ensaios não destrutivos.
- Melhoria dos sistemas de monitorização, no que respeita ao número de sensores e nível de precisão das medições, no acesso remoto à informação através da Internet, mais económicos e de aplicação simplificada, por forma a potenciar a sua aplicação nas Obras de Arte.

Noutra linha desenvolvimentos futuros, uma vez que a IP estabelece com elevada frequência contacto com entidades externas, tais como Câmaras Municipais, para a realização de prestações de serviços que se prendem com a realização de inspeções principais a Obras de Arte, crê-se que a melhoria contínua da informação expressa nos relatórios técnicos, é crucial para o apoio à decisão dos principais intervenientes na gestão de infraestruturas.

Referências bibliográficas

- Abrantes, C. por. (2015). *Tejo a seco (1930-40)*. [Internet]. [citado 11 de agosto de 2018].
Obtido de: <https://porabrantes.blogs.sapo.pt/tejo-a-seco-1930-40-2420217>.
- Ahlskog, J. (1988). *Challenge oh highway bridge evaluation, operation and maintenance*.
13 th IABSE congress - Challenges of structural engineering, Helsínquia, Finlândia.
- Almeida, J. (2013). *Sistema de gestão de pontes com base em custos de ciclo de vida*.
Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Appleton, J., Costa, A., Saraiva, J., & Silva, T. N. (2015). *Reabilitação das
Infraestruturas no troço Entroncamento/Abrantes - Pk 2+930 Ponte do Tejo*. A2P
- CONSULT - Estudos e Projetos, Lda.
- Balageas, D. (2006). Introduction to Structural Health Monitoring.
- Bastos, A. M. (1997). *A experimentação como metodologia de interpretação do
comportamento de estruturas de betão*. Dissertação para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,
Porto, Portugal.
- Branco, C., Fernandes, A., & Paulo, C. (1999). *Fadiga de estruturas soldadas*. Fundação
Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- Brito, J. (1992). *Desenvolvimento de um sistema de gestao de obras de arte em betão*.
Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Universidade
Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Brito, J., & Branco, F. (1990). *Sistema de classificação de anomalias em obras de arte de
betão*. 2 as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, Portugal.
- Brito, J., & Branco, F. (1992). *A decision system for bridge management*. IABSE
Congress on Civilization through Civil Engineering, Nova Deli, Índia.
- Brito, J., & Branco, F. (1994). Sistemas de gestão de obras de arte de betão. *Revista
Portuguesa de Engenharia de Estruturas Nº 37, Lisboa*.
- Calgaro, J.-A., & Lacroix, R. (1997). *Maintenance et réparation des ponts*. Presses de
L'École Nationale des Pont et Chaussés.
- Cardoso, E. (1984). *Ponte sobre o rio Douro e seus acessos. Projeto de execução*. Lisboa.

- Cavadas, F. (2008). *Monitorização e análise do comportamento de pontes metálicas antigas - A Ponte Eiffel*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- CEN. (2003). *Eurocode 1 - Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*. Brussels: European Committee of Standardization (CEN).
- CEN. (2010). *Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço. Parte 1-9: Fadiga*. (Instituto Português da Qualidade, Trad.) Bruxelas.
- Costa, A. (2003). A qualidade na construção, reabilitação e reforço de estruturas. *Actas Do 1º Encontro Nacional Sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios*, 219-237, FEUP, Porto, Portugal.
- Costa, C. (2009). *Análise numérica e experimental do comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria de pedra*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Costa, V. (2009). *Desempenho e reabilitação de pontes rodoviárias: aplicação as casos de estudo*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Portugal.
- Costa, V., Oliveira, D., & Varum, H. (2009). Inspeção, manutenção, conservação e reabilitação, de Obras de Arte. *ASCP'09 - 1º Congresso e Conservação de Pontes ASCP, Lisboa*.
- Cruz, P., Wisniewski, D., & Casas, J. R. (2008). Métodos de avaliação de segurança de pontes existentes. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. Ed. LNEC. *Série II. n.º3*.
- Cunha, Á., Caetano, E., & Magalhães, F. (2010). Novas perspetivas na análise do comportamento dinâmico de estruturas. *Revista Da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, 18, pp.23-24.
- Diamantidis, D. (2001). *Probabilistic assesment of existing structures*. RILEM Publications S.A.R.L., JCSS (The Joint Committee on Structural Safety).
- Farthey, D. N. (2005). Bridge instrumentation and monitoring for structural diagnostics. *Structural Health Monitoring - An International Journal*, Vol 4(Issue 4), pp.301-318.
- Félix, C. (2004). *Monitorização e análise do comportamento de obras de arte*. Dissertação

para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Figueiras, J. (2008). *Monitorização da integridade estrutural de obras de arte*. Encontro Nacional de Betão Estrutural, Guimarães, Portugal.

Figueiredo, E. (2006). *Monitorização e avaliação do comportamento de obras de arte*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Fortunato, E. (2005). *Renovação de plataformas ferroviárias, estudos relativos à capacidade de carga*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Freire, L. (2008). *Sistema de inspeção e diagnóstico de aparelhos de apoio em pontes rodoviárias*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Gil, A. (1979). *Principais defeitos das pontes metálicas*. C.P. Serviço de Pontes.

Gutkowski, R., & Arenella, N. (1998). *Investigation of Pontis - A Bridge Management Software*. Colorado State University.

Hawk, H., & Small, E. P. (1998). *The BRIDGIT Bridge Management System*. Structural Engineering International.

Helene, P. (1986). *Corrosão em armaduras para concreto armado*. Ed. Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT, São Paulo, Brasil.

Hess, J. (2007). *Rail Expansion Joints - The underestimated track work material*. In Workshop Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

IP. (2017). *Sistema de gestão de obras de arte da IP (SGOA IP) - Bases do sistema*. Infraestruturas de Portugal, S.A.

Li, Y. F., Hsieh, S. H., & Lin, Y. S. (2015). A nondestructive evaluation module of bridge management system.

Lopes, N. (2012). *Inspeção de pontes ferroviárias em arcos de alvenaria*. Relatório de projeto para obtenção do grau de Mestre em Reabilitação Urbana. Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal.

Manterola, J., & Cruz, P. (2004). *Pontes: História e Princípios Gerais*.

Marchetti, O. (2008). *Pontes de Concreto Armado* (1ª Edição). Blucher Editora.

- Marecos, J. (1963). *Arrábida Bridge*. Observation of the structure. Lisboa: LNEC.
- Marecos, J., Castanheta, M., & Trigo, J. T. (1969). *Field Observation of Tagus River Suspension Bridge*. Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 95, No ST4, pp. 555-583.
- Martins, J. L. C. (1992). *Ponte s/ o rio Lima - Reforço das vigas principais*. JL Câncio Martins - Projetos de estrutura, Lda.
- Mendes, P. (2010). *Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Mendes, P. (2012). *Dinâmica de Estruturas: Sebenta da Unidade Curricular de Dinâmica de Estruturas*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Mendes, P., & Oliveira, S. (2008). *Análise Dinâmica de Estruturas: Utilização integrada de modelos de identificação modal e modelos de elementos finitos*. (LNEC, Ed.) (1st ed). Lisboa: LNEC.
- Min, X., Santos, L. O., & Suleyman, N. (2016). *Observação e análise do comportamento dinâmico da Ponte Ferroviária de São João sobre o rio Douro*. Encontro Nacional de Betão Estrutural, Coimbra, Portugal.
- Min, X., Santos, L. O., & Suleyman, N. (2017). Monitorização do comportamento dinâmico da Ponte de São João. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. Ed. LNEC. Série III. Nº5, 99–108.
- Pacheco, J. M. (2016). *Ponte ferroviária sobre o rio Tua. Interpretação de dados de monitorização*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Paixão, A., & Fortunato, E. (2009). *ITC informação científica. Transportes - ITC XX. Novas soluções de superestrutura de via para a alta velocidade, comparação com a via balastrada tradicional*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Palmelão, L. (1989). *Gestão de obras de arte em betão - bases para a sua implementação*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Patrício, H. (2018). Pontes ferroviárias metálicas existentes - Caracterização dos materiais e avaliação da fadiga. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. Ed. LNEC. Série III. n.º6., 113–124.

- Pavão, R. C. (2016). *Catálogo de técnicas de diagnóstico em edifícios antigos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Pereira, M. F. (2008). *Comportamento dinâmico de pontes ferroviárias de alta velocidade. Especificações para projeto de estruturas*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Perneta, H., Baptista, A., Correia, M. J., & Salta, M. (2010). Reparação de estruturas metálicas.
- REFER. (2009). *Segurança Ferroviária*. Vol. I. REFER - Rede Ferroviária Nacional.
- Reis, A. (1997). *Pontes - Folhas da disciplina*. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Roberge, P. R. (2007). *Corrosion inspection and monitoring*. John Wiley & Sons, Inc.
- Rocha, M., Borges, J. F., & Marecos, J. (1955). *Observation of some reinforced concrete structures*. Symposium on Observation of Structures, RILEM, Lisbon, pp. 729-753.
- Rodrigues, C., Cavadas, F., Félix, C., & Figueiras, J. (2012). FBG based strain monitoring in the rehabilitation of a centenary metallic bridge. *Engineering Structures 44: 281-290*.
- Rodrigues, C., Figueiras, J., & Félix, C. (2013). Monitorização estrutural em pontes com sistemas de fibra ótica - três exemplos em Portugal. *3º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP2013*.
- Rodrigues, J. (2004). *Identificação modal estocástica. Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Santa, U., & Bergmeister, K. (2000). Techniques for the acquisition, modeling and interpretation of knowledge in monitoring applications. In *Proceedings of the 6th International Workshop on Material Properties and Design, Bauhaus University Weimar*.
- Santiago, S. (2000). *Sistemas de gestão de obras de arte: módulo de apoio à inspeção*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Santos, L. O. (2014). Monitoramento e ensaio de pontes. In *VII Congresso Brasileiro de*

Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro.

Santos, N. (1998). *Conservação e reabilitação de pontes metálicas*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Schläfli, M., Hajdin, R., & Grob, J. (2000). *KUBA - Manuel Technique*. Office fédéral des routes.

Sørensen, A., & Berthelsen, F. (1990). *Implementation of Bridge Management and Maintenance Systems (BMMS) in Europe and the Far East*. Bridge Management Conference, Guildford, Surrey, U.K.

Sørensen, A., & Davidsen, L. (n.d.). *Micro-Computer based system for management of bridges*. Copenhagen, Denmark.

WP4. (2007). Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges - Advices on the use of advanced methods. In *Sustainable Bridges*.