



PONTES METÁLICAS EM AMBIENTE MARÍTIMO: METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO, REPARAÇÃO E PROTECÇÃO

Hugo Miguel Barros Pernetá

(Licenciado em Engenharia Civil)

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À UNIVERSIDADE DA MADEIRA PARA CUMPRIMENTO
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL

Funchal, Julho de 2010



PONTES METÁLICAS EM AMBIENTE MARÍTIMO: METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO, REPARAÇÃO E PROTECÇÃO

Hugo Miguel Barros Pernet

(Licenciado em Engenharia Civil)

ORIENTADORES:

Engenheira Maria Manuela Sequeira Ribeiro de Lemos Salta
(Investigadora Coordenadora do Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

Doutor Luiz Carlos Guerreiro Lopes
(Professor Auxiliar da Universidade da Madeira)

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À UNIVERSIDADE DA MADEIRA PARA CUMPRIMENTO
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL

Funchal, Julho de 2010

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado foi elaborada no âmbito do Projecto nº 049/2009 DURATINET – *Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Area Network*, aprovado no Programa Transnacional Espaço Atlântico, co-financiado pelo FEDER.

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram para a elaboração desta dissertação, particularmente:

À Eng.^a Manuela Salta, pela oportunidade única de integrar um projecto com a relevância do Projecto DURATINET e de desenvolver este trabalho numa instituição de eleição da engenharia civil, como é o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), assim como pelo seu apoio, disponibilidade e conhecimento transmitido, sem o qual seria impossível a realização desta dissertação.

Ao Prof. Luiz Lopes, pela disponibilidade, incentivo e apoio concedidos, principalmente na procura de condições adequadas à realização deste trabalho e na resolução de todos os imprevistos que surgiram.

À Doutora Maria João Correia, pelo conhecimento transmitido na área da investigação e pela paciência e disponibilidade para esclarecer muitas das minhas dúvidas.

Ao Doutor António Baptista, pela disponibilidade e indicações para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Departamento de Materiais - Núcleo dos Materiais Metálicos do LNEC, pela simpatia com que me receberam.

Ao Eng. Hugo Patrício, da REFER, pela documentação disponibilizada e transmissão da sua experiência na área da reabilitação.

Aos amigos e colegas que me ajudaram ao longo do meu percurso na Universidade da Madeira.

E, para finalizar, o meu muito obrigado aos meus pais, Luís Fernão e Maria do Céu, e ao meu irmão Ricardo, pelo amor e apoio incondicional, bem como à minha companheira e amiga Débora, pelo seu amor, força e confiança inabalável.

Resumo

O principal objectivo deste trabalho é fornecer um panorama geral sobre a metodologia a adoptar na reabilitação de pontes metálicas, em particular no que toca à avaliação de danos e reparação, e focar a importância destas obras de arte enquanto legado histórico. Neste sentido, primeiro é apresentada a evolução histórica das pontes metálicas, no mundo e em Portugal, particularmente ao nível de materiais e soluções estruturais. Em seguida, é apresentada uma síntese sobre os principais processos de deterioração e as metodologias a aplicar na reabilitação de pontes metálicas, incluindo a avaliação do estado de conservação e a reparação e protecção dos elementos metálicos. O capítulo da avaliação contém uma abordagem geral à inspecção visual, assim como aos métodos de ensaio não destrutivos e destrutivos que podem ser aplicados na avaliação do estado de conservação. O capítulo da reparação descreve os vários métodos de reparação, aspectos críticos da sua aplicação e campo de aplicação. No último capítulo, sintetizam-se os aspectos mais relevantes na protecção de elementos metálicos, fornecendo informação sobre os sistemas mais utilizados e indicações a ter em conta na sua selecção.

Palavras-chave: pontes metálicas, aço estrutural, reabilitação, deterioração, corrosão, fadiga, danos, defeitos, avaliação, reparação, protecção.

Abstract

The main objective of this work is to provide an overview of the methodology to be adopted in the rehabilitation of metallic bridges, particularly regarding the damage assessment and repair, and to focus the importance of these works of art as a historical legacy. In this sense, it is first presented the historical development of metallic bridges in the world and in Portugal, particularly in terms of materials and structural solutions. Then, it is presented a synthesis of the main deterioration processes and methodologies to be applied in the rehabilitation of metallic bridges, including the assessment of the conservation condition, and the repair and protection of metallic elements. The assessment chapter contains an overall approach to visual inspection as well as to non-destructive and destructive testing methods that can be applied in the assessment of the conservation condition. The repair chapter describes the various methods of repair, critical aspects of their application and field of application. The last chapter summarizes the most relevant aspects in the protection of metallic elements, providing information on the most widely used systems and directions to be taken into account in their selection.

Keywords: metal bridges, structural steel, rehabilitation, deterioration, corrosion, fatigue, damage, defects, assessment, repair, protection.

Índice

1.	Introdução	11
2.	Evolução da construção de pontes metálicas	13
2.1	Enquadramento histórico.....	13
2.2	Materiais	14
2.3	Soluções estruturais	19
3.	Processos de deterioração	33
3.1.1	Corrosão	33
3.1.2	Fadiga	37
4.	Avaliação do estado de conservação de pontes metálicas.....	40
4.1	Generalidades	40
4.2	Defeitos	41
5.	Métodos de reparação de pontes metálicas.....	47
5.1	Esmerilamento	47
5.2	Martelagem.....	48
5.3	Refusão TIG	49
5.4	<i>Stop hole</i>	50
5.5	Soldadura	52
5.6	Aparafusamento.....	54
5.7	Rebitagem	57
5.8	Adição de componentes metálicos	60
5.9	Substituição total ou parcial de elementos estruturais	60
5.10	Desempenamento mecânico	61
5.11	Desempenamento por calor	62
5.12	Polímeros reforçados com fibras de elevada resistência (FRP)	64
6.	Métodos de protecção dos elementos metálicos.....	66
6.1	Protecção catódica.....	66
6.1.1	Generalidades	66
6.1.2	Sistemas de protecção catódica.....	69
6.1.3	Seleção do sistema de protecção catódica.....	71

6.2	Sistemas de revestimento	72
6.2.1	Generalidades	72
6.2.2	Revestimentos orgânicos	73
6.2.3	Revestimentos metálicos	75
6.2.4	Seleção do sistema de revestimento	77
6.3	Preparação de superfície.....	86
6.3.1	Generalidades	86
6.3.2	Métodos de preparação da superfície	88
6.3.3	Seleção do método de preparação da superfície	95
7.	Conclusões e sugestões.....	100
7.1	Considerações finais e conclusões do estudo	100
7.2	Propostas de desenvolvimento futuro.....	101
8.	Referências.....	102

Índice de figuras

Figura 1 Ponte de Coalbrookdale	13
Figura 2 Viaduto de Xabregas	14
Figura 3 Evolução dos processos siderúrgicos	15
Figura 4 Evolução dos tipos de aço	16
Figura 5 Evolução das ligações nas estruturas metálicas.....	17
Figura 6 Ponte em aço patinável	18
Figura 7 Viaduto de Garabit	19
Figura 8 Ponte Eads	19
Figura 9 Ponte Hohenzollern	20
Figura 10 Ponte do Observatório	20
Figura 11 Ponte Union	21
Figura 12 Ponte Menai Straits.....	21
Figura 13 Ponte Wheeling	21
Figura 14 Ponte Clifton	21
Figura 15 Ponte Cincinnati-Covington	22
Figura 16 Ponte George Washington	23
Figura 17 Ponte de Brooklyn	23
Figura 18 Ponte Golden Gate	23
Figura 19 Ponte Theodor Heuss	24
Figura 20 Ponte Britannia	24
Figura 21 Ponte Tczew	25
Figura 22 Ponte Saint-Jean	25
Figura 23 Viaduto de Granfey	25
Figura 24 Ponte sobre o rio Reno	26
Figura 25 Ponte Firth of Forth	27
Figura 26 Ponte da Praia do Ribatejo	27
Figura 27 Ponte da Régua	28
Figura 28 Ponte da Portela	28

Figura 29 Ponte D. Maria Pia	28
Figura 30 Ponte Luís I	29
Figura 31 Ponte D. Luís.....	30
Figura 32 Ponte do Lima.....	30
Figura 33 Ponte 25 de Abril	31
Figura 34 Corrosão: (a) uniforme; (b) localizada, do tipo intersticial	34
Figura 35 Aceleração da corrosão em zonas microclimáticas na estrutura: (a) zonas de condensação; (b) zonas de retenção de água e detritos	35
Figura 36 Tipos de fissuras em ligações soldadas: (a) soldadura de topo; (b) soldadura de ângulo	38
Figura 37 Curvas de resistência à fadiga para medição directa do intervalo de tensões	39
Figura 38 Tipos básicos de danos: (a) Contaminação; (b) Deformação; (c) Deslocamento; (d) Descontinuidade; (e) Deterioração; (f) Perda de material.....	41
Figura 39 Método do líquido penetrante.....	43
Figura 40 Tabela resumo informativa de ensaios DT	45
Figura 41 Defeitos por degradação das pinturas: (a) fissuração; (b) empolamento; (c) pulverulência; (d) descamação; (e) corrosão	46
Figura 42 Métodos de esmerilamento: (a) com rebarbador; (b) com disco de esmeril	48
Figura 43 Equipamento para a refusão TIG: 1. Fornecimento de gás inerte; 2. Máquina de soldadura; 3. Porta-eléctrodos; 4. Conductor eléctrico; 5. Isolante (insulating heath); 6. Passagem de gás; 7. Gás de protecção; 8. Objecto a soldar; 9. Linha de terra	50
Figura 44 Localização do furo (“stop hole”)	51
Figura 45 Soldadura por arco: 1. Máquina da soldadura por arco; 2. Porta-eléctrodos; 3. Eléctrodo; 4. Objecto a soldar; 5. Linha de terra.	52
Figura 46 Adição de chapas metálicas soldadas	53
Figura 47 Defeitos típicos do metal fundido da junta: (a) undercut; (b) falta de fusão; (c) falta de penetração; (d) porosidade; (e) inclusões de escórias; (f) fendas	54
Figura 48 Ligação aparafusada: 1. Parafuso; 2. Anilhas; 3. Conjunto a fixar; 4. Porca	54
Figura 49 Ligação aparafusada.....	56
Figura 50 Ligação rebitada: 1. Furos dos rebites; 2. Rebites quentes; 3. Cabeças formadas; 4. Cabeças marteladas	57
Figura 51 Tipos de rebites: (a) cabeça tipo “snap”; (b) cabeça tipo “pan”; (c) cabeça embutida plana; (d) cabeça embutida redonda	57
Figura 52 Tipos de juntas rebitadas: (a) junta sobreposta, com solicitação ao corte único; (b) com solicitação ao corte duplo; (c) junta a topo, com uma chapa de cobertura e rebitagem em fileira única; (d) junta a topo, com uma chapa de cobertura e rebitagem em fileira dupla; (e) junta a topo, com duas chapas de cobertura e rebitagem em fileira única; (f) junta a topo, com duas chapas de cobertura e rebitagem em fileira dupla	58

Figura 53 Tipos de solicitação nas ligações rebitadas: (a) rebites solicitados ao corte; (b) rebites solicitados à tracção	59
Figura 54 Ligação rebitada	59
Figura 55 Exemplos de chapas de reforço: (a) Chapas soldadas; (b) Chapas sobreposta aparafusadas; (c) Chapas gusset aparafusadas	60
Figura 56 Substituição de elementos: (a) Substituição parcial; (b) Substituição total	61
Figura 57 Categorias fundamentais de danos	64
Figura 58 Diagrama de potencial pH: representação esquemática do conceito de protecção catódica, com regiões activa, passiva e de imunidade	66
Figura 59 Representação dos sistemas de protecção catódica em água do mar: (a) galvânico; (b) corrente imposta	69
Figura 60 Aplicação de um revestimento por pintura: (a) por pincel; (b) por projecção	73
Figura 61 Preparação de superfície por esmerilamento mecânico	89
Figura 62 Hidrodecapagem	92

Índice de Tabelas

Tabela 1 Categorias de corrosividade atmosférica, respectivas velocidades de corrosão de aço carbono durante o primeiro ano de exposição e exemplos de ambientes típicos	36
Tabela 2 Categorias de corrosividade em água e solos ¹⁾	36
Tabela 3 Índice de avaria	42
Tabela 4 Métodos NDT aplicáveis a estruturas metálicas	44
Tabela 5 Categorias de ligações aparafusadas	55
Tabela 6 Valores nominais da resistência máxima f_{yb} e do esforço de tracção no estado limite último f_{ub} para parafusos	56
Tabela 7 Deformação permitida a elementos estruturais de pontes em aço	62
Tabela 8 Propriedades de fibras normalmente utilizadas em estruturas metálicas	65
Tabela 9 Potenciais de protecção de materiais de aço não ligados ou de baixa liga, no solo, na água doce e na água do mar	67
Tabela 10 Valores orientadores para o dimensionamento da densidade de corrente para protecção de aço nu em lama salina e em água do mar	68
Tabela 11 Vantagens e desvantagens dos sistemas de protecção catódica com ânodos com corrente imposta e ânodos de sacrifício	71
Tabela 12 Comparação entre revestimentos metálicos e orgânicos	78
Tabela 13 Preparação de superfície exigida, de acordo com a condição inicial da superfície do aço	80
Tabela 14 Comparação de custos entre diferentes sistemas de protecção de aço estrutural ...	81
Tabela 15 Categorias de durabilidade	82
Tabela 16 Propriedades gerais de diferentes tipos genéricos de tintas	84
Tabela 17 Compatibilidade de diferentes tipos genéricos de tintas	85
Tabela 18 Procedimentos para remoção de camadas exteriores e matéria estranha	94
Tabela 19 Condição de superfícies pintadas	97
Tabela 20 Informação a considerar antes da elaboração de uma especificação	98
Tabela 21 Especificação do grau de ferrugem	99

1. Introdução

A construção de pontes metálicas teve início no final do séc. XVII e, desde então, tem vindo a evoluir com soluções estruturais optimizadas, acompanhando o desenvolvimento da indústria metalúrgica. Muitas destas pontes têm uma idade avançada e encontram-se desadequadas à sua função, seja devido à deterioração do material ou à crescente solicitação das cargas circulantes. É neste quadro que a actividade da reabilitação assume particular importância.

Por razões de sustentabilidade e também de economia, torna-se fundamental a adopção de práticas vantajosas do ponto de vista económico, tais como a reabilitação/reforço das pontes existentes, em detrimento da construção de novas estruturas. O aumento da densidade urbana, que dificulta a construção de estruturas novas, também é uma realidade actual. Outro factor relevante é o valor destas estruturas enquanto património cultural. Considerando estes factores, torna-se importante preservar as pontes metálicas existentes e procurar garantir uma durabilidade idêntica ou superior para as estruturas mais recentes.

A maioria das estruturas metálicas expostas ao ambiente marítimo estão sujeitas a diferentes tipos de patologias. Os principais processos de deterioração que ocorrem neste tipo de estruturas podem ser classificados como físicos, químicos e biológicos e compreendem todos os fenómenos que contribuem para a redução da resistência e funcionalidade da estrutura. Além dos processos de deterioração acidentais, e.g. incêndios ou sismos, os mecanismos mais recorrentes neste tipo de estruturas são a corrosão e a fissuração por fadiga, sendo também necessário considerar a deterioração dos sistemas de protecção contra a corrosão. Este tipo de deterioração, para além da acção ambiental, pode também ter como causas erros de pormenorização do projecto, de construção ou até mesmo de utilização e a sua desconsideração pode ter consequências significativas no comportamento do metal à corrosão e, assim, acelerar os efeitos deste fenómeno.

Devido à deterioração inerente das estruturas metálicas, é essencial que existam planos de manutenção adequados, que permitam avaliar de forma periódica o estado de conservação das obras de arte, através da identificação e quantificação de danos e respectivas causas, assim como das respectivas consequências para a segurança da estrutura. Sempre que o diagnóstico dos danos identificar problemas, é necessário analisar as medidas de intervenção e escolher o método de reparação mais apropriado, assim como o sistema de protecção contra a corrosão mais adequado face às condições ambientais.

Com esta dissertação pretende-se, depois da apresentação da evolução histórica das pontes metálicas, fazer uma análise das metodologias correntemente aplicadas na sua reabilitação. Os principais processos de deterioração e consequentes danos serão identificados, assim como os métodos adequados à sua avaliação e, subsequentemente, os métodos de reparação e protecção que podem ser aplicados.

A elaboração desta dissertação surge do trabalho desenvolvido no âmbito do Projecto DURATINET – *Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Area Network* (<http://www.duratinet.org/>), onde um dos objectivos é “produzir recomendações

práticas sobre manutenção e reparação das infra-estruturas de betão armado e de aço”.

2. Evolução da construção de pontes metálicas

2.1 Enquadramento histórico

A máquina a vapor deu início à revolução industrial no final do séc. XVII, mas os caminhos-de-ferro apenas surgem no séc. XIX, em Inglaterra. Na segunda metade deste século, este meio de transporte generaliza-se por toda a Europa e torna-se num dos principais factores de desenvolvimento e, conseqüentemente, de necessidade de construir as respectivas vias.

No entanto, a primeira ponte metálica a ser construída foi rodoviária, a Ponte de Coalbrookdale (Figura 1), em 1779. As pontes ferroviárias apenas surgem em 1825, com a construção do viaduto de Gaunless, projectado por Stephenson para a Linha de Stockton-Darlington.



Figura 1 Ponte de Coalbrookdale ^[1]

A história das pontes metálicas em Portugal está ligada à construção de estradas e à sua evolução desde a criação do Ministério das Obras Públicas, Comércio e Indústria e do Conselho Superior de Obras Públicas, em 1852. A ponte rodoviária de Bertandos, em Viana do Castelo, é indicada pela antiga Junta Autónoma de Estradas (JAE) ^[2] como a primeira ponte metálica rodoviária construída em Portugal, no ano de 1874. No entanto, a primeira estrutura metálica portuguesa que se tem conhecimento é o viaduto de Xabregas (Figura 2), destinado ao tráfego ferroviário e inaugurado em 1854.



Figura 2 Viaduto de Xabregas

Em Portugal, tal como no resto da Europa, a construção de pontes metálicas também está ligada à expansão dos caminhos-de-ferro. Actualmente, cerca de 40% das pontes ferroviárias são metálicas, correspondendo a um comprimento total aproximado de 23,4 km, enquanto as não metálicas correspondem apenas a 15 km. A maioria das pontes metálicas tem mais de um século, correspondendo a um comprimento aproximado de 9,2 km ^[3].

O património em pontes metálicas em Portugal é assinalável e muitas destas obras de arte devem ser consideradas como “monumentos históricos”. A neutralidade portuguesa na 2ª Guerra Mundial, aliada às dificuldades financeiras de Portugal, que deram origem a uma política de reparação e/ou reforço das pontes, permitiu a conservação destes equipamentos.

Na sequência desta política, em 1929 foi criada a Secção de Pontes da JAE ^[2], com o principal objectivo de estudar e executar trabalhos de reparação, reforço e substituição de pontes. Por volta de 1999, a JAE foi extinta e originou três institutos rodoviários, entre os quais o Instituto das Estradas de Portugal (IEP). Poucos anos depois, este instituto deu lugar às Estradas de Portugal (EP), actual responsável pela conservação das obras de arte pertencentes à Rede Rodoviária Nacional (RRN).

Quanto à conservação das pontes ferroviárias, a entidade responsável era a Companhia Real dos Caminhos de Ferro, constituída em 1860 e transformada nos Caminhos de Ferro Portugueses (CP) em 1951. Por volta de 1997, devido a imposições comunitárias, foi criada a Rede Ferroviária Nacional (REFER), actual responsável pela conservação das pontes ferroviárias, especificamente através da Secção de Pontes do Departamento de Estruturas e Projectos Especiais.

2.2 Materiais

Estruturais

No início do séc. XVIII, Abraham Darby I desenvolve um método de produção de ferro de alta qualidade, o ferro fundido. Passadas três gerações, no final do mesmo século, Abraham Darby III constrói a primeira ponte metálica em Coalbrookdale (Figura 1), em

1777-79. Esta ponte foi projectada por T.M. Pritchard e ainda está em serviço, após ter sido objecto de reabilitação.

Por volta de 1784, surge o ferro pudelado, também designado por *wrought iron* (ferro forjado) na literatura inglesa, após o desenvolvimento do processo de pudelagem do ferro por Henry Cort, e começa a ser utilizado em pontes por volta de 1800^[4].

Desde 1777, até por volta de 1840, o ferro fundido e pudelado foram os materiais mais utilizados na construção de pontes metálicas, pois apresentavam uma boa resistência à corrosão e propriedades mecânicas que, de algum modo, se complementavam nas suas aplicações, i.e., o ferro fundido com uma boa resistência à compressão e o ferro pudelado à tracção.

O aço começou a ser produzido no final do séc. XVIII e a sua utilização na construção de pontes começou no início do séc. XIX. Nessa altura, o processo de produção do aço não permitia a sua utilização em grande escala. Apenas com a invenção e desenvolvimento do processo siderúrgico de Bessemer por volta de 1855 e, mais tarde, dos processos de Thomas-Gilchrist e Siemens-Martin, é que foi possível produzir aços mais limpos, em quantidade e com melhores características^[4]. Estes progressos foram ao encontro da grande necessidade de então, devido à expansão dos caminhos-de-ferro por toda a Europa.

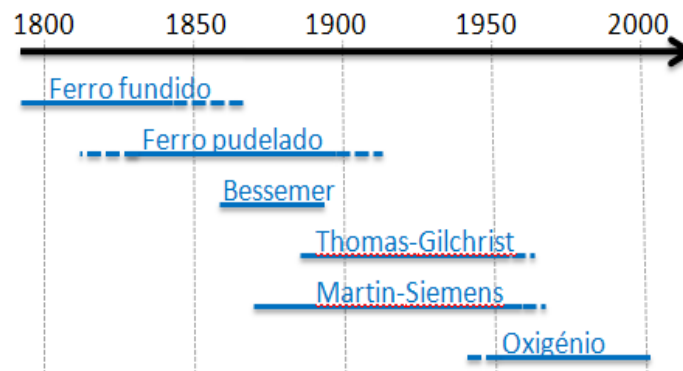


Figura 3 Evolução dos processos siderúrgicos (adaptado de [4])

Por volta de 1870, surge o aço laminado e, em 1874, é concluída a primeira grande ponte de aço no mundo, a ponte Eads, em Saint Louis, Missouri, com três vãos de 159m cada. De referir ainda outras duas referências mundiais das pontes em aço: a ponte suspensa de Brooklyn, em Nova Iorque, construída em 1883, e a ponte tipo *cantilever* Firth of Forth, na Escócia, em 1890.

Ainda em relação à construção de pontes em aço, é necessário tomar em consideração que, durante algumas épocas, nomeadamente durante a grande recessão (1929-1939), a 1ª (1914-18) e a 2ª Guerra Mundial (1939-45), o aço era produzido num ritmo muito elevado. Este facto traduz-se na possibilidade de algumas das pontes construídas nestas épocas poderem apresentar alguns problemas de durabilidade devido à fraca qualidade do aço, principalmente com o aumento das cargas actuantes^[4].

Ao longo do séc. XX, assistiu-se a outros progressos na siderurgia do aço, com o desenvolvimento de novos tipos de aço com maior resistência e ductilidade. A partir

de 1960, os desenvolvimentos nos aços fracamente ligados conduziram aos aços designados de alto desempenho (*High Performance Steel*, HPS). Com uma excelente tenacidade e ductilidade, boa soldabilidade e, simultaneamente, elevada resistência à corrosão, este tipo de aço permitiu a construção de pontes inovadoras, reduzindo significativamente o seu peso e custo.

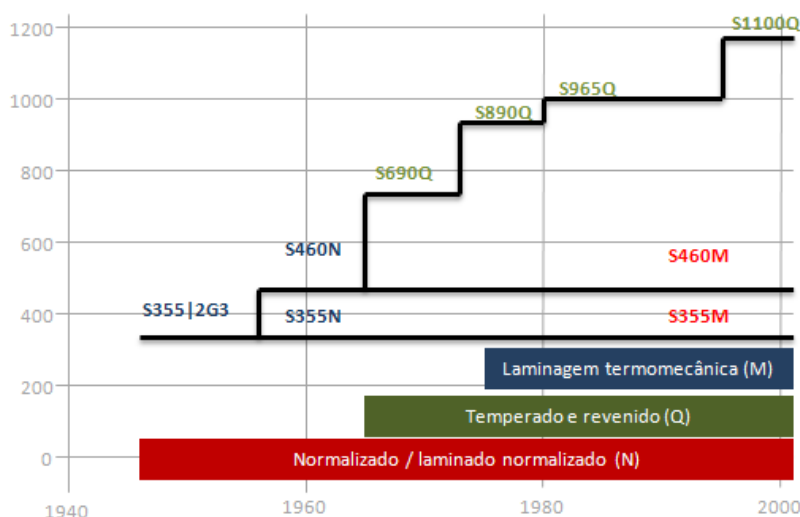


Figura 4 Evolução dos tipos de aço (adaptado de [4])

A partir de 1935, a construção de pontes metálicas começa a ser abandonada em detrimento do betão armado e da técnica do betão pré-esforçado, que surgem por volta de 1880 e 1930 respectivamente. A primeira grande ponte em betão armado foi a ponte Camille de Hogues, em Châtelleraut, construída em 1899-1900, por François Hennebique ^[2]. A partir desta altura, a construção de pontes metálicas em Portugal, resume-se praticamente a duas grandes pontes sobre o rio Tejo, a ponte Marechal Carmona, em 1951, e a Ponte 25 de Abril, em 1966.

Ligações entre componentes

Desde o início da construção metálica até cerca de 1930 não se verificaram evoluções no tipo de ligações utilizadas, que consistiam essencialmente em ligações rebitadas e com parafusos correntes. Por volta de 1930, surge a soldadura na construção metálica e, em 1950, os parafusos de alta resistência. Estes dois tipos de ligação permitiram dar resposta a solicitações de carga muito superiores às ligações anteriores. No entanto, as estruturas soldadas vieram aumentar o risco de situações de falha devido à fissuração por fadiga ^[4].

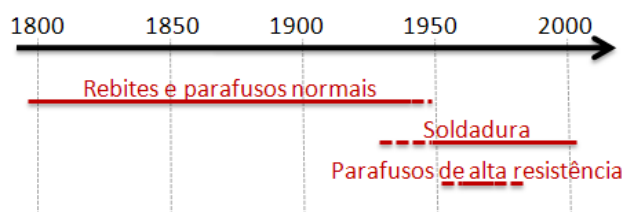


Figura 5 Evolução das ligações nas estruturas metálicas (adaptado de [4])

Sistemas de protecção contra a corrosão

Relativamente aos materiais utilizados na protecção por pintura contra a corrosão, os primeiros a serem utilizados foram as tintas à base de chumbo. Não se sabe exactamente quando é que este sistema de protecção começou a ser adoptado como sistema preferencial contra a corrosão, mas suspeita-se que seja por volta de 1874. As pontes Eads, Brooklyn e Firth of Forth foram protegidas com este tipo de pintura e já estão em serviço há mais de dois séculos^[4].

Este tipo de tintas tem um desempenho excelente, pois geralmente permite uma durabilidade expectável superior a 100 anos, sob diferentes condições de exposição e classes de corrosividade ambiental, desde que as estruturas e os respectivos sistemas de protecção sejam submetidas a manutenções periódicas. No entanto, a partir de 1970, por razões ecológicas e de saúde pública, este tipo de tintas foi proibido e substituído por novos sistemas.

Para além dos revestimentos por pintura, existem também os revestimentos metálicos, normalmente de zinco ou ligas Zn-Al, e os revestimentos “duplex”, que consistem na junção do revestimento metálico com a pintura. A aplicação de revestimentos metálicos apresenta-se como uma boa solução para estruturas aéreas, pois apresenta uma boa durabilidade na maioria dos ambientes. No entanto, a exposição à atmosfera induz alterações cromáticas do zinco que provocam um visual pouco atractivo, pelo que, para satisfazer também requisitos estéticos, é aconselhável a utilização do sistema “duplex”, permitindo ainda maior durabilidade^[4].

Actualmente, existem alguns tipos de aço, nomeadamente os aços patináveis (*weathering steel*), que não necessitam de protecção contra a corrosão (Figura 6). A exposição deste tipo de aço à atmosfera forma produtos de corrosão à superfície do metal-base que o protege contra a corrosividade do ambiente. No entanto, o aço patinável é apenas indicado para classes de corrosividade baixas, pois não é eficaz na protecção contra ambientes agressivos, tais como ambientes marítimos.

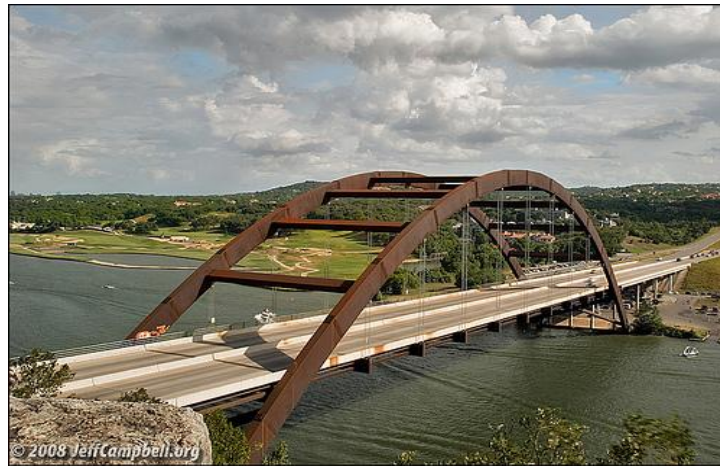


Figura 6 Ponte em aço patinável^[4]

2.3 Soluções estruturais

Antigamente um dos principais problemas na construção de pontes era a concepção e construção de fundações no leito dos rios, tornando conveniente a construção de pontes com grandes vãos. A solução encontrada foi a construção metálica, que permitiu pontes mais leves e, conseqüentemente, com maiores vãos. A construção de pontes metálicas data de finais do séc. XVII e vem evoluindo com soluções estruturais optimizadas, analogamente ao desenvolvimento da indústria metalúrgica.

Pontes em arco

Conforme previamente referido, a primeira ponte metálica foi a ponte Coalbrookdale (Figura 1), projectada por T.M. Pritchard e construída por Abraham Darby III. Esta ponte, com um vão de 30m, ainda está em funcionamento, após reabilitação, e o seu sucesso é atribuído à adequação do sistema estrutural —ponte em arco — ao material utilizado, ferro fundido.

Esta adequação do material à tipologia construtiva da ponte em arco foi desenvolvida pelo engenheiro Reichenbach, que criou um método onde os tubos em ferro são utilizados como elementos em compressão do arco. Um dos melhores exemplos deste sistema é a ponte Carrousel, construída em 1839 por Polonceau, em Paris ^[5].

Um dos principais impulsionadores das pontes em arco foi Gustave Eiffel, que dirigiu e fundou a *Société Eiffel*, em 1866, um gabinete dedicado ao estudo e construção de estruturas metálicas. Uma dessas estruturas metálicas foi o viaduto de Garabit (Figura 7), construído em França no ano de 1884 e que foi uma das principais obras de Eiffel.

Uma outra ponte em arco importante, devido a ser a primeira ponte em aço e ter batido o recorde de maior vão do mundo da época com 159m, foi a ponte Eads (Figura 8), em Saint Louis, Missouri. Esta ponte rodoviária e ferroviária, construída em 1874, ainda é utilizada e foi baptizada em homenagem ao seu projectista, J.B. Eads ^[5].

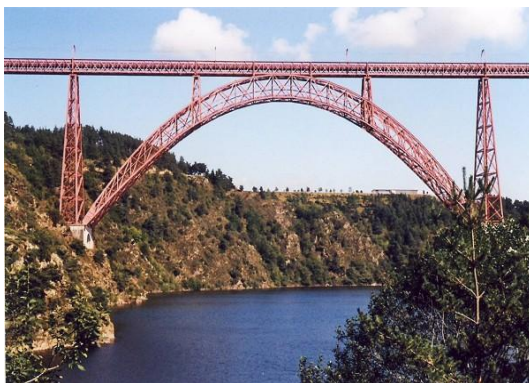


Figura 7 Viaduto de Garabit ^[1]



Figura 8 Ponte Eads ^[1]

Além das pontes em arco mencionadas, com tabuleiro superior, temos também um outro tipo de sistema estrutural, as pontes em arco atirantadas, com tabuleiro inferior. As primeiras pontes deste tipo foram construídas em Hamburgo, sobre rio Elba, por

volta de 1899. Podemos encontrar um bom exemplo deste tipo de solução estrutural na ponte Hohenzollern (Figura 9), em Colónia, construída em 1910.



Figura 9 Ponte Hohenzollern ^[1]

Este tipo de sistema estrutural comporta-se da mesma forma que uma estrutura de viga em treliça, que será apresentada mais à frente, onde o arco desempenha as funções dos membros superiores da treliça e o tabuleiro as de membros inferiores. No entanto, a utilização deste tipo de pontes em arco permite suportar cargas maiores e vencer maiores vãos do que as vigas em treliça ^[5].

Posteriormente, tem sido utilizado outro tipo de ponte em arco, similar à solução anterior, a solução tipo Bowstring. Esta solução estrutural consiste num tabuleiro inferior suspenso por tirantes que transferem as cargas para o arco metálico. Um bom exemplo da versatilidade deste tipo de pontes é a ponte do Observatório, em Liége (Figura 10), construída em 2002 e projectada por Santiago Calatrava.



Figura 10 Ponte do Observatório ^[1]

Pontes suspensas

Por volta de 1819, Samuel Brown inventa um tipo de corrente em ferro e constrói a primeira ponte pênsil em ferro pudelado na Europa, a ponte Union (Figura 11), no Reino Unido. Pouco tempo mais tarde, em 1826, Thomas Telford construiu outra ponte pênsil que bate o recorde de ponte com maior alcance da época, a ponte Menai Straits (Figura 12), também no Reino Unido ^[5].



Figura 11 Ponte Union ^[1]



Figura 12 Ponte Menai Straits ^[1]

Dentro desta tipologia construtiva, temos que referir a Grande Ponte Suspensa, construída por Joseph Chaley na Suíça, em 1834, e demolida em 1923. Esta ponte pênsil foi construída em ferro pudelado, tinha um vão único de 273m e foi a maior ponte do mundo até à construção da ponte Wheeling (Figura 13), nos Estados Unidos da América (EUA). A ponte rodoviária Wheeling, projectada por Charles Ellet Jr., foi construída em 1849 e destruída por uma tempestade em 1855. No entanto, foi reconstruída e ainda está em funcionamento actualmente.

Ainda outra ponte pênsil digna de referência é a ponte Clifton (Figura 14), no Reino Unido, da autoria de Brunel. Esta ponte rodoviária foi construída em ferro pudelado no ano de 1864 e actualmente ainda exerce a sua função.



Figura 13 Ponte Wheeling ^[1]



Figura 14 Ponte Clifton ^[1]

Enquanto na Europa se construíam pontes suspensas por correntes de ferro (ponte pênsil), nos Estados Unidos da América começavam-se a desenvolver os cabos metálicos, que eram consideravelmente mais resistentes. No entanto, a primeira ponte suspensa por cabos metálicos foi construída na Europa, a ponte de Saint-Antoine. Esta ponte pedestre foi construída em 1823, na cidade de Genebra, e é da autoria de G.H. Dufour e Marc Séguin ^[5].

O principal problema deste tipo de pontes residia no facto de ser difícil garantir a mesma força de tracção em todos os fios do cabo metálico. Tal situação foi resolvida por John A. Roebling, que desenvolveu um método de enrolamento mecânico dos cabos *in situ*, que havia sido previamente sugerido pelo engenheiro francês L.J. Vicat.

Em 1866, John A. Roebling construiu a maior ponte suspensa do mundo da época, a ponte Cincinnati-Covington (Figura 15), sobre o rio Ohio. Esta ponte era originalmente em ferro forjado, com um vão máximo de 322 m, e o tabuleiro era constituído por uma treliça ^[5]. Por volta de três décadas após a sua construção, esta ponte foi reforçada com cabos de aço e o tabuleiro substituído por outro, igualmente em aço.



Figura 15 Ponte Cincinnati-Covington ^[1]

A primeira ponte a exceder um vão de 1 km, nomeadamente 1.067 m, foi a ponte suspensa George Washington (Figura 16), em Nova Iorque, construída em 1931. Esta ponte foi projectada por Othmar H. Ammann, que utilizou quatro cabos de aço com 91cm de diâmetro e com 20.000 fios cada ^[5].



Figura 16 Ponte George Washington ^[1]

Outras pontes de referência dentro deste sistema estrutural são a ponte de Brooklyn (Figura 17), construída em 1883 e considerada uma obra-prima da engenharia, e a ponte Golden Gate (Figura 18), construída por Joseph Strauss no ano de 1937, em São Francisco, Califórnia. A ponte Golden Gate tem uma extensão de 1.281 m e é, sem dúvida, a mais conhecida de todas as pontes suspensas.



Figura 17 Ponte de Brooklyn ^[1]



Figura 18 Ponte Golden Gate ^[1]

O tipo de estrutura mais recente nas pontes metálicas é a ponte atirantada. Embora este tipo de ponte seja usualmente enquadrado dentro das pontes suspensas devido ao seu aspecto visual, na realidade o seu comportamento é muito mais similar a uma ponte em viga contínua, sobre apoios relativamente elásticos. Estes apoios elásticos são fornecidos pelos tirantes em vários pontos do tabuleiro e permitem a construção de grandes vãos com vigas relativamente finas ^[5].

A primeira ponte atirantada foi construída na Alemanha, a ponte Theodor Heuss (Figura 19), em 1957. Esta ponte em aço foi projectada por F. Tamms e F. Leonhardt com vãos de 108+260+108 m.



Figura 19 Ponte Theodor Heuss ^[1]

Pontes em viga

Em 1844, os caminhos-de-ferro britânicos decidiram construir uma linha ferroviária entre Londres e a ilha Anglesey, no País de Gales. Para tal ser possível, foi necessário construir uma ponte sobre o Estreito de Menai. Esta ponte foi encomendada a Stephenson, que, após estudar as pontes em arco e as pontes suspensas por correntes de ferro (ponte pênsil), decidiu construir uma ponte com a forma de dois tubos rectangulares, nos quais poderiam passar as duas vias do caminho-de-ferro. Foi então construída a ponte Britannia (Figura 20), sobre o estreito de Menai, em 1850. Esta ponte em ferro pudelado demonstrou que vigas compostas, com reforços espaçados, eram suficientemente resistentes para suportar um vão com mais de 142 m, em recurso a diagonais de reforço. Assim surgiu a construção com vigas de alma cheia e foi dado o primeiro passo rumo às pontes em vigas caixão ^[5].



Figura 20 Ponte Britannia ^[1]

Não se sabe bem quando foi construída a primeira ponte em viga treliça, mas uma das primeiras e maiores pontes da Europa com este sistema estrutural foi construída em 1857, a ponte Tczew (Figura 21), projectada por Carl Lentze. Esta ponte em ferro pudelado foi fortemente influenciada pela ponte *Britannia* e tem seis vãos de cerca de 131m.

A ponte que serviu como modelo para as pontes de vigas em treliça dos caminhos-de-ferro, foi a ponte Saint-Jean (Figura 22), construída em Bordéus no ano de 1860 ^[2].



Figura 21 Ponte Tczew ^[1]



Figura 22 Ponte Saint-Jean ^[1]

O viaduto de Grandfey (Figura 23), construído na Suíça em 1862, é considerado a primeira estrutura em treliça com os elementos em compressão bem adaptados ^[5]. Esta ponte em ferro pudelado tinha sete vãos de 49m e a sua montagem consistiu no lançamento do tabuleiro em treliça sobre os pilares metálicos.

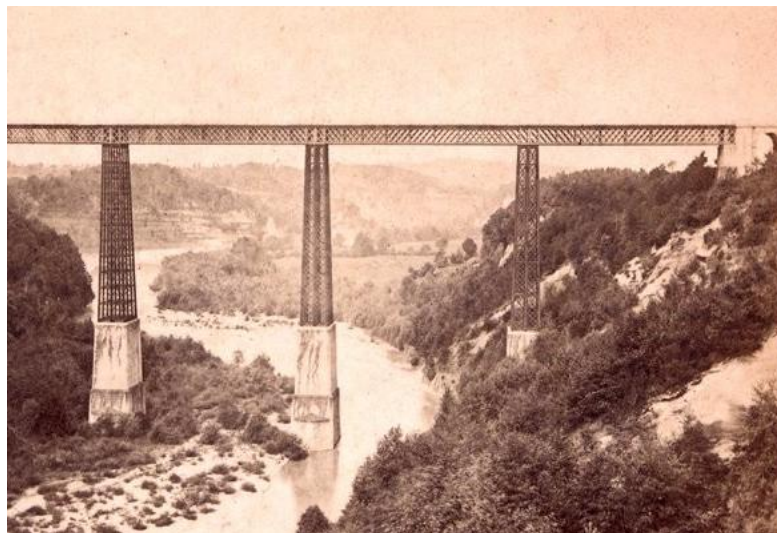


Figura 23 Viaduto de Grandfey ^[1]

A construção de pontes em treliça foi desenvolvida exaustivamente por Gustave Eiffel, que construiu muitas pontes para os caminhos-de-ferro franceses e portugueses, e.g. viaduto de Garabit (Figura 7) e várias pontes da Linha da Beira Alta.

A ponte Britannia foi um excelente exemplo para o impulso da construção de pontes em vigas caixão, que surgiu a partir do desenvolvimento da soldadura, por volta de 1925. No início da utilização deste tipo de ligações houve muitos problemas causados por fenómenos de fadiga, que, na altura, obviamente ainda não eram conhecidos. No entanto, após o período inicial de aprendizagem, houve um aumento muito rápido do comprimento dos vãos, como, por exemplo, a ponte sobre o rio Reno, na Alemanha, construída em 1948 com vãos de 99+196+99m^[5].



Figura 24 Ponte sobre o rio Reno^[1]

Pontes em consola

No séc. XIX, as pontes com vários vãos eram quase todas divididas, sobre os pilares, em vãos únicos. Nessa época, já existia conhecimento dos benefícios, a nível de comportamento estático, das vigas contínuas. No entanto, esta solução não era utilizada devido aos problemas que acarretava no dimensionamento das fundações. Este obstáculo foi resolvido por volta de 1868, quando German H. Gerber tem a ideia de introduzir juntas em vigas contínuas. O princípio das “vigas de Gerber” é aplicado na solução estrutural tipo *cantilever*^[5].

A construção de pontes em consola ou tipo *cantilever* consiste, essencialmente, em aumentar a altura da viga em treliça para o nível dos pilares, tornando possível a construção das consolas a meio vão, sem ser necessário recorrer a qualquer tipo de escoramento. Esta técnica construtiva é particularmente útil quando se pretende atravessar águas profundas e/ou agitadas.

Uma das maiores e mais representativas pontes em consola é a ponte Firth of Forth, na Escócia. Esta ponte em aço foi projectada por Sir Benjamin Barker e Sir John Fowler e construída em 1883-1890, tornando-se na ponte com maior vão do mundo da época, com 521m.



Figura 25 Ponte Firth of Forth ^[1]

Pontes em Portugal

A primeira estrutura metálica a ser construída em Portugal foi o Viaduto de Xabregas (Figura 2), em ferro fundido, projectado por John Sutherland Valentine, e a construção de grandes pontes metálicas em Portugal tem início com a construção da ponte ferroviária da Praia do Ribatejo sobre o rio Tejo (Figura 26), em 1862, que entretanto foi substituída pela actual Ponte da Praia ^[2]. Relativamente a pontes metálicas projectadas por portugueses, a mais antiga foi a ponte da ribeira de Noemi, projectada por Bento d'Eça, José Garção e José de Andrade e inaugurada em 1876 ^[6].



Figura 26 Ponte da Praia do Ribatejo

A partir de 1870, generaliza-se o modelo de ponte em viga treliça, com tramos rectos e perfis cruzados de rótula simples ou múltipla. Pouco tempo depois, em 1872, também começa a ser utilizado outro tipo de solução estrutural, as pontes em viga utilizando o sistema Schwedler. Este sistema é uma variação das pontes em arco atirantadas, consistindo em vigas com o banzo inferior recto e o superior parabólico ^[2]. Dois

exemplos deste tipo de pontes são a ponte da Régua (Figura 27) e a da Portela (Figura 28), construídas em 1872 e 1873, respectivamente.



Figura 27 Ponte da Régua



Figura 28 Ponte da Portela

A ponte D. Maria Pia e a ponte Luís I, no Porto, são, sem dúvida, duas das mais importantes pontes metálicas construídas em Portugal. Estas pontes contribuíram significativamente para o desenvolvimento do país, ao encurtar a distância entre o norte e o sul, e contribuíram para a evolução da tecnologia de construção, principalmente a ponte D. Maria Pia. Esta ponte foi o primeiro grande sucesso de Eiffel na implementação de uma das suas ideias, a preparação de obra na construção metálica, desde a concepção até à mais pequena pormenorização ^[5].

A ponte D. Maria Pia (Figura 29), projectada por Gustave Eiffel e Théophile Seyrig, foi construída em 1878 e desactivada em 1991. Esta ponte tem um vão principal de 160 m e serviu de modelo para outras grandes obras de Eiffel, como o viaduto de Garabit (Figura 7). O reconhecimento da importância da ponte D. Maria Pia é demonstrado na atribuição do título de *Civil Engineering Historical Landmark* pela Ordem dos Engenheiros portugueses e pela *American Society of Civil Engineers*. Felizmente, neste momento está em curso um projecto que visa a sua reabilitação.

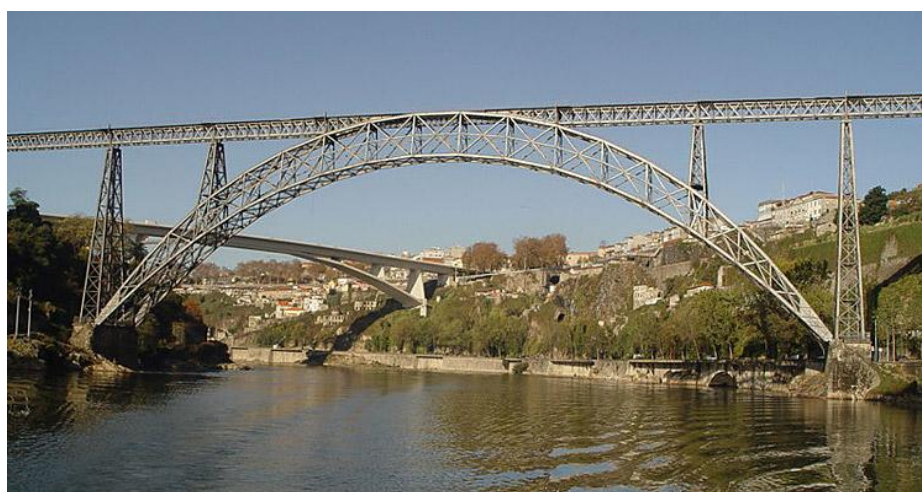


Figura 29 Ponte D. Maria Pia

Poucos anos após a construção da ponte D. Maria Pia, foi construída a ponte Luís I (Figura 30) que visava a substituição da ponte pênsil do Porto. A ponte Luís I foi construída em 1886 e é da autoria de Théophile Seyrig, um antigo colaborador de Eiffel. Esta ponte foi inicialmente projectada para servir o tráfego rodoviário e pedonal, mas recentemente foi alvo de obras de reforço, de modo a permitir a passagem do Metro do Porto. Esta obra é um excelente exemplo da capacidade de adaptação das pontes metálicas antigas às necessidades actuais, pois neste momento está a funcionar com cargas muito superiores às previstas inicialmente, no séc. XIX.



Figura 30 Ponte Luís I

Outra ponte construída na mesma altura das duas grandes pontes do Porto foi a ponte D. Luís, sobre o rio Tejo (Figura 31), em Santarém. Esta ponte foi, de algum modo, ofuscada pelas anteriores, mas também teve a sua importância no desenvolvimento do país. A ponte D. Luís foi construída em 1881 e projectada com uma estrutura em viga treliça por F. Moreaux^[2]. Após ser sujeita a uma intervenção de reforço da autoria do engenheiro Edgar Cardoso, esta ponte continua a servir o tráfego rodoviário.



Figura 31 Ponte D. Luís

Além da ponte D. Maria Pia, Gustave Eiffel projectou mais de 20 pontes para os caminhos-de-ferro portugueses, na sua maioria em ferro pudelado e com uma estrutura de viga em treliça. Algumas das pontes referidas são as pontes do Milijoso, Breda, Criz, Dão e Trezói, em 1879-1881, pertencentes à Linha ferroviária da Beira Alta, a ponte do Fão, sobre o rio Cávado, em 1892, pertencente à Linha ferroviária do Minho, e principalmente a ponte do Lima, em Viana do Castelo, que Eiffel sempre considerou a sua obra-prima.

A ponte do Lima (Figura 32), em Viana do Castelo, construída em ferro pudelado, data de 1886 e divide-se numa estrutura metálica contínua com 562 m, de vigas de rótula múltipla, com dois tabuleiros sobrepostos apoiados em pilares de alvenaria. Os viadutos de acesso também são constituídos por vigas contínuas, apoiadas transversalmente em pórticos múltiplos ^[2]. Esta ponte foi sujeita a obras de reforço há cerca de 20 anos e recentemente foi substituído o tabuleiro rodoviário.



Figura 32 Ponte do Lima

A partir de 1927, construíram-se muitas pontes metálicas em Portugal, mas quase sempre com o mesmo tipo de solução estrutural. Prevalece, então, a construção de pontes em vigas metálicas rectas, de alma cheia ou rota, simples ou múltipla, apoiadas em pilares de pedra ou ferro fundido ^[2]. Uma das excepções foi a ponte 25 de Abril, construída em 1962-66.

A ponte 25 de Abril (Figura 33) é, actualmente, a mais importante e conhecida ponte metálica portuguesa. Esta ponte foi baptizada de ponte Salazar e foi construída pelas empresas americanas *United States Steel Export Company* e *Morrison-Knudsen Company*, enquanto o projecto de dimensionamento ficou a cargo de *Steinman, Boynton, Gronquist & London*. Para esta obra de arte, foi adoptada uma solução de ponte suspensa, similar à ponte Golden Gate, de São Francisco.



Figura 33 Ponte 25 de Abril

A ponte 25 de Abril foi construída em aço com ligações aparafusadas e tem um tabuleiro em viga treliça contínua, com um comprimento total de cerca de 2.277 m, onde o vão principal tem cerca de 1.013 m, os dois vãos adjacentes 483 m e os dois viadutos 100 m. Esta viga de rigidez, em viga treliça contínua, tem 10,65 m de altura e 21m de largura e continua a ser uma das mais longas do mundo. Os cabos metálicos de suspensão consistem em 37 cordões de aço, compostos por 11.248 fios de 5mm de diâmetro paralelos, com um comprimento total de 54.196 km. Esta ponte também foi protegida contra a corrosão, nomeadamente através da galvanização e esquemas de pintura ^[2]. Inicialmente, esta ponte abriu apenas ao tráfego rodoviário, mas no entanto a disposição dos espaçadores foi dimensionada para uma futura utilização ferroviária, como se pode verificar actualmente.

Pontes mistas

Uma das soluções estruturais mais aplicadas actualmente é a da ponte mista. Este tipo de ponte utiliza o betão e o aço, tirando partido das melhores características de cada um deles e, normalmente, temos um tabuleiro metálico com pilares e laje de betão. A construção de pontes mistas oferece diversas vantagens, tais como leveza, facilidade de construção, protecção atmosférica do aço pelo betão e bom comportamento dinâmico^[3].

3. Processos de deterioração

A degradação das pontes metálicas normalmente ocorre por processos de deterioração física ou por reacções químicas e biológicas, que consistem essencialmente no fenómeno da corrosão.

Os processos de deterioração física referem-se a processos de fadiga e a impactos de veículos, sobrecargas ou deformações acidentais, resultantes de assentamentos, escavações e, ainda, de acções sísmicas ou do fogo. Normalmente, estes processos não podem ser previstos, mas os danos consequentes são relativamente simples de detectar, assim como a escolha da reparação ou reforço adequados.

Além dos danos acidentais, o tipo de defeitos mais recorrentes nas pontes metálicas são resultantes de fenómenos de corrosão e fadiga.

3.1.1 Corrosão

A corrosão é um processo natural de deterioração de um metal ou liga, que resulta da reacção com o meio ambiente e depende dos mecanismos envolvidos e da corrosividade do ambiente. O metal estrutural tem um potencial de corrosão que pode ser acelerado pelos seguintes factores ^[4]:

- ✓ Actividade microbiológica;
- ✓ Perda das características protectoras do sistema de protecção anti-corrosão;
- ✓ Erros de pormenorização;
- ✓ Utilização menos adequada.

Este processo é normalmente classificado em dois tipos, nomeadamente corrosão uniforme e localizada (Figura 34). A corrosão uniforme implica um desgaste do material por corrosão igualmente distribuída em toda a superfície. A corrosão localizada implica um desaparecimento localizado do material e pode assumir as seguintes formas:

- Intersticial – e.g. em espaços confinados, nas interfaces da sobreposição de chapas;
- Por picadas – normalmente em ambientes agressivos com grande concentração de cloretos;
- Galvânica – devido ao contacto com outros metais.



Figura 34 Corrosão: (a) uniforme; (b) localizada, do tipo intersticial

Outro fenómeno que podem ocorrer, envolvendo a corrosão, é a corrosão sob tensão. Este tipo de processo de deterioração consiste na acção conjunta da corrosão e de tensões mecânicas, estáticas ou dinâmicas, que diminuem a vida à fadiga da estrutura, resultando na redução do tempo de início da fissuração ou no aumento da sua velocidade de propagação. Para evitar este tipo de problema, é aconselhável a aplicação de métodos de tratamento da superfície, para reduzir as tensões, e a selecção de aços menos susceptíveis a fenómenos de fragilização por hidrogénio.

A existência de fases e de inclusões, especialmente sulfuretos e escórias, e as características metalográficas, que são determinadas pelas fronteiras de grão, são alguns dos factores condicionantes do comportamento à corrosão de um metal. Estas fronteiras de grão consistem em descontinuidades estruturais ou em diferenças químicas, que resultam em zonas susceptíveis de fenómenos de corrosão localizada.

Além das características da liga, a resistência à corrosão das ligas ferrosas depende significativamente da corrosividade do ambiente. O aço não ligado requer um sistema de protecção adequado em qualquer ambiente, assim como os novos tipos de aço ligado, pois, embora sejam mais resistentes à corrosão, continuam a precisar de um sistema de protecção adequado. No entanto foi desenvolvido um tipo de aço, o aço patinável (*weathering steel*), que através da exposição ambiental forma uma camada protectora de produtos de corrosão na superfície do aço. O ferro fundido tem um elevado conteúdo em carbono, que proporciona uma boa resistência à corrosão uniforme. Esta situação ocorre porque os produtos de corrosão também têm um elevado teor em carbono que dá estabilidade à camada de óxidos, mas no entanto torna o material susceptível à corrosão localizada. Quanto ao ferro pudelado, este tem uma boa resistência à corrosão, em decorrência do elevado conteúdo de escórias não reactivas, devido à acção de frenagem proporcionada na progressão de processos de corrosão.

É essencial um bom conhecimento das características de corrosividade do ambiente de exposição, tanto no projecto de uma nova estrutura como na manutenção de estruturas existentes. Deve ser feita uma avaliação das condições ambientais, tanto macro como microambientais, de modo a proceder à identificação das causas da deterioração e à selecção adequada de métodos de reparação, que resultem num desempenho optimizado da estrutura.

O ambiente envolvente de uma estrutura deve ser considerado na escolha do método de reparação e/ou protecção das estruturas metálicas, pois tem uma influência considerável na velocidade de corrosão do aço. De acordo com a norma EN 12500:2000 ^[7], que é baseada na acção dos principais agentes corrosivos, o tipo de atmosfera é caracterizado da seguinte forma:

- 1) Atmosfera rural – ambiente atmosférico de zonas rurais e pequenas cidades, sem contaminação significativa de agentes agressivos.
- 2) Atmosfera urbana – ambiente atmosférico de zonas densamente populadas, com concentração moderada de poluentes e sem concentração industrial destes.
- 3) Atmosfera industrial – ambiente atmosférico de zonas com elevada contaminação de poluentes corrosivos, devido à actividade industrial.
- 4) Atmosfera marítima – ambiente atmosférico sobre o mar ou terra, mas com contaminação de sais transportados pelo ar.
- 5) Atmosfera marítima e industrial – ambiente atmosférico perto da costa e de zonas de concentração industrial com contaminação moderada a elevada de agentes corrosivos.

Outro factor a considerar são as condições microclimáticas, que ocorrem em função da geometria e posição do elemento. Os factores microambientais podem criar condições que aceleram a velocidade da corrosão (Figura 35) e criar:

- ✓ Zonas de condensação, retenção de água ou detritos;
- ✓ Desgaste do sistema de protecção por abrasão;
- ✓ Exposição à acção microbiológica.



(a)

(b)

Figura 35 Aceleração da corrosão em zonas microclimáticas na estrutura: (a) zonas de condensação; (b) zonas de retenção de água e detritos.

A norma ISO 9223:1992 ^[8] especifica classes de corrosividade de acordo com algumas informações ambientais, nomeadamente o tempo de “molhagem” e o nível de poluição, ou baseadas na velocidade de corrosão de diferentes metais. A Tabela 1

mostra um exemplo de classificação da corrosividade do ambiente para um metal específico, nomeadamente o aço carbono.

Tabela 1 Categorias de corrosividade atmosférica, respectivas velocidades de corrosão de aço carbono durante o primeiro ano de exposição e exemplos de ambientes típicos (adaptado de [8] e [9])

Categoria Corrosividade		Taxa de corrosão do aço carbono		Exemplos de ambientes típicos num clima moderado (apenas informativo)	
		g/(m ² a)	µg/a	Exterior	Interior
C ₁	Muito baixa	≤ 10	≤ 1,3	—	Edifícios com aquecimento, com atmosfera limpa.
C ₂	Baixa	> 10 a 200	> 1,3 a 25	Atmosferas com baixo nível de corrosão. Geralmente zonas rurais.	Edifícios sem aquecimento, onde ocorre condensação.
C ₃	Média	> 200 a 400	> 25 a 50	Atmosferas urbanas e industriais com poluição de dióxido sulfúrico moderada. Zona costeira com baixa salinidade	Compartimentos de produção com elevada humidade e alguma poluição no ar.
C ₄	Alta	> 400 a 650	> 50 a 80	Zonas costeiras e industriais com salinidade moderada.	Plantas químicas, piscinas, navios e estaleiros costeiros.
C ₅₋₁	Muito alta	> 650 a 1500	> 80 a 200	Zonas industriais com elevada humidade e atmosfera agressiva.	Edifícios ou zonas com condensação quase permanente ou elevada poluição.
C _{5-M}				Zonas costeiras e em mar alto, com alta salinidade.	

Em relação às estruturas imersas ou enterradas, é difícil definir as categorias de corrosividade, devido aos inúmeros factores de influência. No entanto, a norma NP EN ISO 12944-2^[9] agrupa estes ambientes (Tabela 2), de forma a poderem ser utilizados na escolha de um sistema de protecção adequado para este tipo de estruturas.

Tabela 2 Categorias de corrosividade em água e solos (adaptado de [9])

Categoria	Ambiente
Im 1	Água doce
Im 2	Água do mar
Im 3	Solo

3.1.2 Fadiga

O fenómeno de fadiga é um processo de deterioração cumulativa, localizada e permanente, que resulta da acção de cargas cíclicas. Esta deterioração acumulada eventualmente causa o início da fissuração e subsequente propagação, conduzindo muitas vezes à ruptura parcial ou completa de elementos estruturais. Este processo geralmente se inicia em zonas com concentrações elevadas de tensões, onde a tensão localizada excede o limite de elasticidade do metal.

A vida à fadiga de uma estrutura é o seu tempo de vida previsto, sob a aplicação de um intervalo de tensões expectáveis, até que ocorra falha. Os parâmetros principais que influenciam a vida à fadiga de uma estrutura são ^[4]:

- ✓ Tensões – incluem a tensão máxima e mínima, o intervalo de tensões e o número de ciclos;
- ✓ Ambiente de exposição – inclui a temperatura e a agressividade do ambiente;
- ✓ Geometria e propriedades do elemento – incluem erros de pormenorização, dimensão, gradiente da tensão e propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal base e do metal de enchimento.

A concentração de tensões está directamente relacionada com o processo de fabricação e com a geometria e pormenorização do desenho. Na pormenorização e na execução do projecto é fundamental ter em atenção todos os pormenores que possam causar fissuração por fadiga. Os erros de pormenorização podem promover a concentração de tensões numa dada zona, tornando-a susceptível à fissuração por fadiga. Este aspecto torna-se ainda mais importante no caso de ocorrer, simultaneamente, redução da secção devido à corrosão.

Nas estruturas com ligações rebitadas ou por parafusos, a concentração de tensões e tensões residuais derivadas do processo de execução são factores críticos que influenciam o comportamento à fadiga da estrutura. No caso de pontes metálicas antigas rebitadas, caso de muitas das pontes portuguesas ainda em utilização, a rotura por fadiga pode ocorrer devido a causas como microfissuras em torno dos orifícios dos rebites, resultantes da operação de mandrilagem, ou então iniciadas pelo desenvolvimento de corrosão. De acordo com *Khun et al.* ^[10], as causas típicas da fissuração por fadiga em estruturas rebitadas/aparafusadas são:

- ✓ Mandrilagem ou processo de rebitagem;
- ✓ Alteração da geometria;
- ✓ Chapas de conexão finas;
- ✓ Restrição, distorção e flexão fora de plano;
- ✓ Tensões secundárias devido a barras à tracção;
- ✓ Entalhes e concentração de tensões localizadas;
- ✓ Apoios corroídos ou presos;
- ✓ Pormenorização fraca, com pouca resistência à fadiga e carregamento elevado.

As estruturas metálicas mais susceptíveis a fenómenos de fadiga são as pontes com ligações soldadas. Estas ligações são geralmente zonas críticas, devido à sua susceptibilidade à concentração de tensões e a tensões residuais, mas também devido aos problemas inerentes ao processo de execução da soldadura, nomeadamente defeitos e heterogeneidades induzidas na microestrutura. Estes factores transformam as ligações soldadas em zonas preferenciais ao desenvolvimento da fissuração por fadiga, que se manifesta nos vários tipos de fissuração ilustrados na Figura 36. Entre os vários tipos de fissuras, as mais difíceis de detectar são as que se desenvolvem a partir da raiz da soldadura, que normalmente exigem a utilização de técnicas de inspecção não destrutivas.

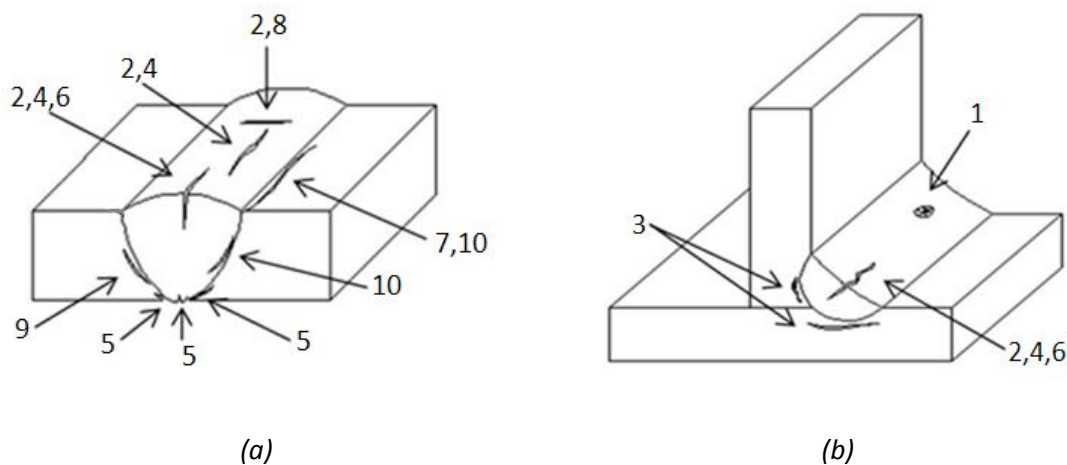


Figura 36 Tipos de fissuras em ligações soldadas: (a) soldadura de topo; (b) soldadura de ângulo.

1. fissura tipo cratera; 2. fissura na face da soldadura; 3. fissura lamelar; 4. fissura longitudinal; 5. fissura na raiz da soldadura; 6. fissura no bordo da soldadura; 7. fissura na concordância da junta; 8. fissura transversal; 9. fissura sob cordão; 10. fissura na interface da soldadura.

De acordo com Khun *et al.* ^[10], as causas típicas da fissuração por fadiga em estruturas soldadas são:

- ✓ Soldadura pobre ou defeitos de soldadura;
- ✓ Falta de fusão;
- ✓ Restrição;
- ✓ Vibração;
- ✓ Descontinuidades (*web gaps*);
- ✓ Deformação contínua por torção (*web breathing*).

Após o início da fissuração, a propagação subsequente pode desenvolver-se de duas formas, nomeadamente num crescimento contínuo das fissuras, que propagam para elementos estruturais principais e secundários, ou em fissuras derivadas do alívio de restrições, que param em zonas com baixas tensões. Esta situação deve ser identificada, porque o primeiro tipo de propagação pode resultar na fractura do elemento estrutural, com as respectivas consequências na segurança da estrutura.

A resistência à fadiga de um metal, num pormenor especificado, é caracterizada pelo número de ciclos que o metal consegue suportar, com um determinado intervalo de tensões, antes da ocorrência de falha. Esta caracterização é proporcionada pelas curvas de resistência à fadiga (Figura 37), curvas S-N, indicadas pelo Eurocódigo 3, Parte 1-9^[11].

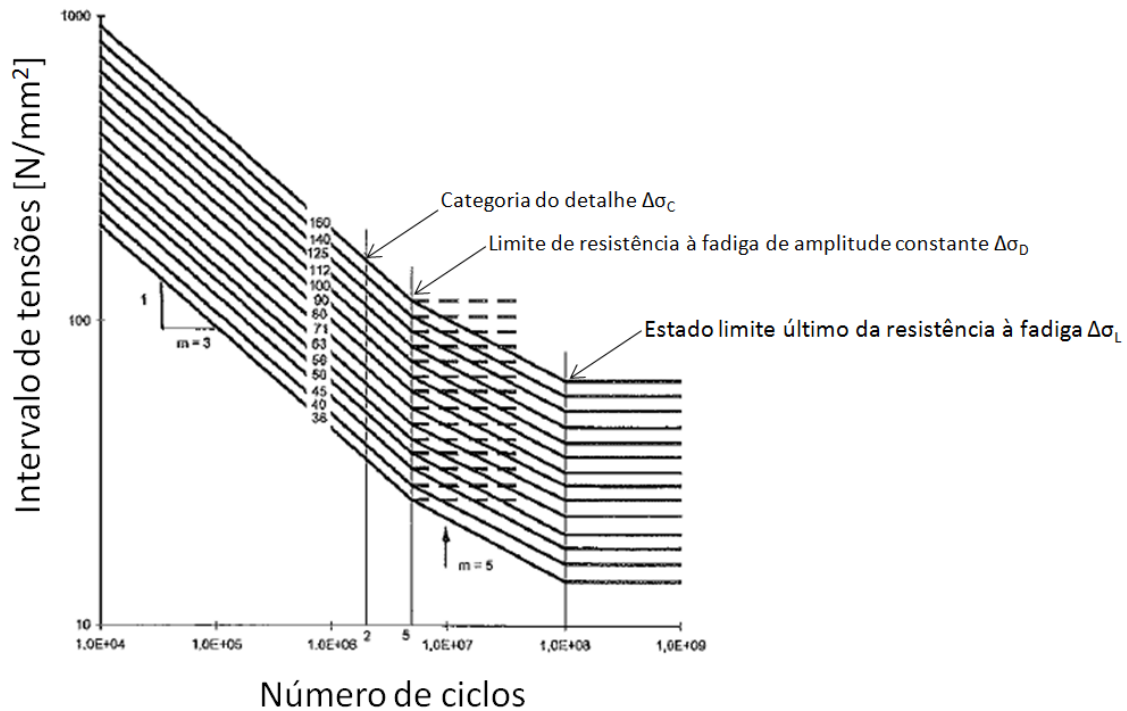


Figura 37 Curvas de resistência à fadiga para medição directa do intervalo de tensões ^(adaptado de [11])

A avaliação do comportamento à fadiga de materiais estruturais também pode ser realizada através de ensaios em amostras retiradas de zonas seleccionadas da estrutura, de modo a obter as curvas S-N referidas anteriormente. No caso de serem identificados problemas relacionados com fenómenos de fadiga, deve-se tomar medidas adequadas de reparação, mitigação e/ou monitorização ou, em último caso, de desactivação da estrutura.

4. Avaliação do estado de conservação de pontes metálicas

4.1 Generalidades

Um factor fundamental para uma ponte atingir o tempo de vida proposto pelo projecto é a existência de planos de manutenção adequados. Normalmente, nestes planos de manutenção, são considerados três tipos de inspecção, definidos como:

- Inspeção de rotina – tem uma periodicidade anual ou a cada 18 meses e pretende a elaboração de um relatório baseado na análise visual, classificando os diversos componentes de acordo com a extensão dos seus danos. A inspecção deve abranger todos os componentes importantes e, se possível, deve-se efectuar medições nos aparelhos de apoio. Durante esta inspecção, pode-se também efectuar operações simples de limpeza e manutenção.
- Inspeção principal – tem um ciclo de três a cinco anos e o objectivo principal de avaliar o estado de conservação da estrutura em relação ao seu estado original. Este tipo de inspecção tem por base a inspecção visual, com a possibilidade de recorrer a métodos de controlo expeditos, tais como a batida do martelo. Também pode utilizar-se ensaios não destrutivos para conhecimento interno da estrutura e dos processos de deterioração. Os defeitos na pintura e os danos por corrosão devem ser verificados por medição da espessura por métodos directos ou técnicas de ultra-sons. Quanto a zonas críticas e fissuras de fadiga, a sua identificação é efectuada por observação assistida por métodos não destrutivos simples. Neste tipo de inspecção, além da classificação dos danos de acordo com a sua extensão, também deverá ser efectuada uma classificação dos danos ou anomalias observadas.
- Inspeção especial – deve ser realizada de uma forma programada, sempre que seja detectado algum defeito relevante, dano físico accidental, corrosão, fissuração ou identificados pormenores prejudiciais ao comportamento à fadiga, que coloquem dúvidas acerca do estado de funcionamento da ponte ou que solicitem estudos específicos ou a utilização de algum tipo de equipamento não corrente. As decisões relativas à reabilitação de uma estrutura devem basear-se em inspecções deste tipo.

As estruturas estão expostas a vários processos de deterioração ao longo da sua vida útil, resultando no aparecimento de diferentes tipos de defeitos decorrentes da sua degradação. Logo, é fundamental a realização de uma avaliação adequada do estado de conservação, de modo a decidir sobre uma eventual necessidade de reparação e, assim, garantir o bom desempenho da estrutura durante o tempo de vida proposto.

A avaliação do estado de conservação de uma ponte consiste na identificação de defeitos estruturais e na comparação destes com os critérios definidos em projecto. Nesta avaliação, é fundamental aplicar metodologias adequadas à classificação dos defeitos e identificação da sua influência no comportamento da estrutura.

4.2 Defeitos

A classificação primária dos danos ou defeitos pode ser efectuada utilizando três tipos de critérios, considerando a causa, a causa e o efeito, ou apenas o efeito. Na maior parte das vezes, não é fácil identificar a(s) causa(s) do defeito, dando origem a diferentes interpretações. Este facto levou à recomendação, por parte da União Internacional dos Caminhos de Ferro (UIC) ^[12], da adopção do critério do efeito, de modo a ser possível uma certa uniformidade na classificação dos defeitos. Então, os tipos básicos de defeitos podem ser divididos da seguinte forma (Figura 38):

- a) Contaminação – Presença de qualquer tipo de sujidade ou vegetação não projectada.
- b) Deformação – Alteração geométrica significativa, prejudicial ao desempenho da estrutura.
- c) Deslocamento – Alteração da localização de um ou mais componentes estruturais, prejudicial ao desempenho da estrutura, incluindo restrições a elementos previstos.
- d) Descontinuidade – Falta de continuidade no material estrutural não prevista no projecto.
- e) Deterioração – Alteração das características físicas e/ou químicas dos materiais estruturais, prejudicial ao desempenho da estrutura.
- f) Perda de material – Redução do material existente na estrutura, relativamente ao projectado.

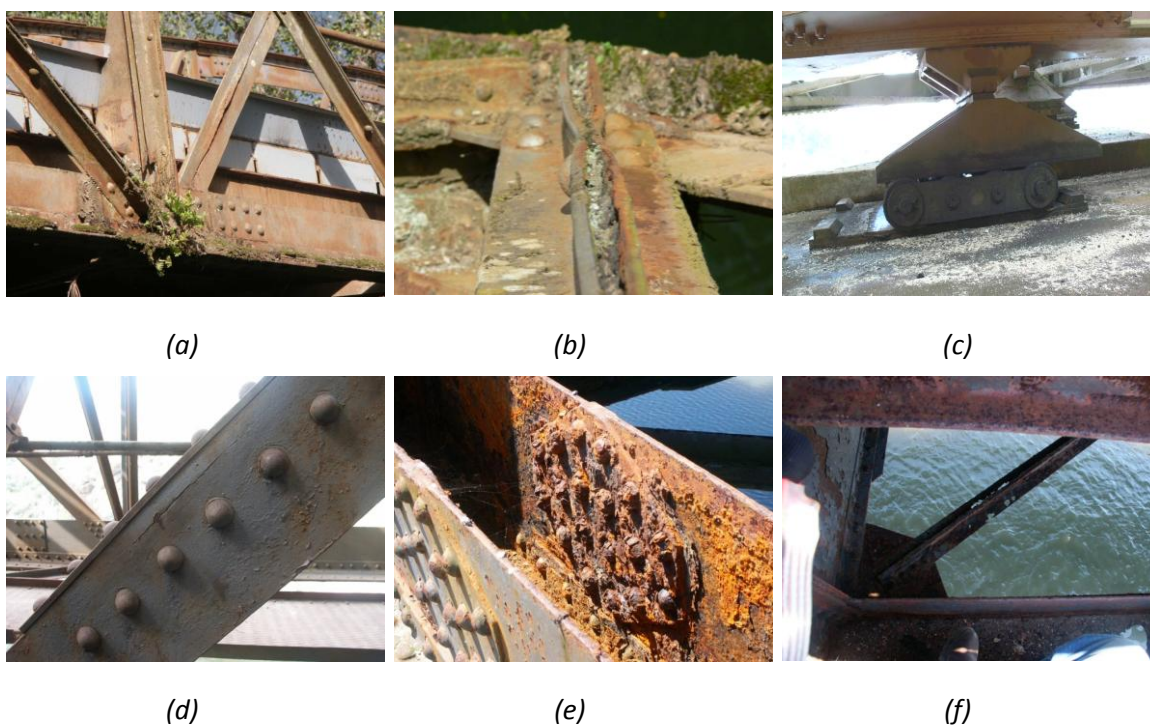


Figura 38 Tipos básicos de danos: (a) Contaminação; (b) Deformação; (c) Deslocamento; (d) Descontinuidade; (e) Deterioração; (f) Perda de material (cedidas por REFER)

Após a identificação, é necessário definir a extensão do defeito, pois este nem sempre constitui uma avaria. Uma avaria implica um defeito suficientemente extenso, que põe em causa o estado de conservação da estrutura e que, por isso, exige correcção. A Tabela 3 ilustra o índice de avaria recomendado pela UIC ^[12].

Tabela 3 Índice de avaria (adaptado de [12])

Índice	Descrição do defeito	Reparação do defeito
0	Sem defeitos	Não é necessário reparação
1	Defeitos menores	Reparação a longo prazo (> 3 anos)
2	Defeitos sérios sem efeitos a curto prazo	Reparação a curto prazo (< 1 ano)
3	Defeitos sérios com efeitos a curto prazo	Reparação a curto prazo (ano corrente)
4	Defeitos que exigem acções imediatas	Reparação imediata

Durante a avaliação de defeitos, é importante distinguir os tipos de defeitos inerentes ao fabrico do material daqueles que são resultantes da execução de trabalhos. Por exemplo, os defeitos da pintura podem não exercer influência alguma durante o ciclo de vida útil da estrutura, a não ser diminuir a densidade do sistema de protecção, enquanto os defeitos promovidos por processos de deterioração podem reduzir parcialmente ou completamente a sua funcionalidade.

A fissuração por fadiga pode ser facilmente identificável através da observação a olho nu da fissura sob acção de cargas cíclicas, pois é possível observar a sua propagação. Em caso deste tipo de fissuração em elementos principais da estrutura, i.e. vigas principais ou transversais, é necessário recorrer a uma inspecção especial, de modo a proceder a uma avaliação detalhada da extensão e consequências do dano na segurança da estrutura.

A detecção de perda de espessura na superfície do metal ou entre chapas, devido à corrosão, pode reduzir a resistência destes elementos e assim constituir risco para a estabilidade da estrutura. Então, este tipo de defeito também deve ser quantificado, de modo a determinar a necessidade de reparação.

Quando não é possível a recolha dos dados necessários à avaliação através da inspecção visual, deve-se recorrer a métodos de ensaio não destrutivos (NDT), tais como o método do líquido penetrante (Figura 39).



Figura 39 Método do líquido penetrante (cedidas por REFER)

A Tabela 4 descreve os métodos NDT mais correntes na avaliação de estruturas metálicas.

Tabela 4 Métodos NDT aplicáveis a estruturas metálicas

Método de ensaio	Fundamento	Aplicação
Magnetoscopia	A superfície de aço é magnetizada e pequenas partículas de ferro fosforescentes são aplicadas. Estas partículas são atraídas pela descontinuidade do campo magnético, identificando assim a fissura.	Identificação de fissuras à superfície; verificação de furações após remoção de rebites e antes da aplicação de parafusos pré-esforçados; controlo da execução da técnica de reparação <i>stop hole</i> .
Líquido penetrante	O líquido penetrante é aplicado na superfície do material e absorvido por capilaridade, revelando, após algum tempo, as fendas.	Identificação de fissuras à superfície.
Radiográfico	O elemento de aço é irradiado com raios gama e, após penetração, os defeitos são apresentados como imagens acinzentadas num filme ou imagem do elemento.	Identificação de fissuras à superfície e internas.
Ultra-sons	Emissão de sons de elevada frequência que atravessam o material, sendo reflectidas nas descontinuidades ou superfície do material.	Detecção de descontinuidades e sua localização em profundidade; medida da espessura do material (exceto no ferro pudelado).
Correntes de Eddy/Foucault	Baseia-se nos princípios da indução electromagnética. Os defeitos são identificados quando as correntes eléctricas induzidas são distorcidas.	Detecção de fissuras nas furações após remoção de rebites e em elementos com fraca espessura; medição da espessura das camadas do revestimento.
Emissão acústica	O movimento súbito de materiais sob tensão produz emissões acústicas que podem ser lidas por sensores.	Deformação do material, fissuras em chapas sobrepostas e fissuras activas em propagação.

Muitas vezes, também é necessário recorrer a ensaios de carácter destrutivo (DT) para conhecer as características e propriedades do material estrutural ou para verificar a compatibilidade de esquemas de pintura novos com outros existentes. Este tipo de ensaios ocorre principalmente em estruturas antigas e envolve procedimentos de recolha de amostras, que devem ser sempre acompanhados por um engenheiro de estruturas, de modo a garantir a estabilidade estrutural em todas as intervenções. A Figura 40 exemplifica uma tabela de informações sobre ensaios DT, efectuados, ao longo dos anos, a algumas das pontes da REFER.

PONTES	LINHA	P.K.	ANO CONST.	CÓDIGO PEÇAS	ANO DO ENSAIO	ENTIDADE RESPONS.	tensão média (Kg/mm ²)			Mod. Elas. (kg/mm ²)	RESIL. (J)	ANÁLISE QUÍMICA (%)					EXAME METAL.	FADIGA n° ciclos	OBSERVAÇÕES	
							cedência	rotura	segur.			C	SI	Mn	S	P				
MARIA PIA (CONT)				7		LNEC	25,5	34,5	14											
				ARCO	1966	CP-GOB	28,3	34,1	14											
				PILAR	1966	CP-GOB	26,8	33,7	14										(retirada de serviço)	
MEIRINHO	B. BAIXA	34,985	1889	1	1967	LNEC	27	33		19400										
				7	1967	LNEC	27	35		20100										
				6	1967	LNEC							0,02	0,1	<0,025			SIM		
MENDALVÃO	B. BAIXA	13,223	1891	7	1966	CP-GOB	25,5	34	14									substituída 1967		
MIRA	MINHO	126,732	1876	TABULEIRO	1960	CP-GOB	26,8	38,7	14										substituída 1996	
				7	1960	CP-GOB		36	13											
MOCATE	NORTE	168,318	1884	14	1969	LNEC	25	36		18800									substituída 1983	
MOINHO PORTO VA	NORTE	158,017	1809	V.P.	1977	CP-GOB		40,7	14,7											
				CONTRAV.	1977	CP-GOB		36,6	13,2											
MOINHO PORTO VD	NORTE	158,017	1809	TABULEIRO	1977	CP-GOB	28,4	35,6	14											
				CONTRAV.	1977	CP-GOB	29,3	39,9	14											
MONÇÃO	MINHO	146,360	1815	4	1989	LNEC	25	38		18800										
				5	1989	LNEC	26	37		21700		0,06	0	0,33	0	0,12	SIM			
				6	1989	LNEC	26	34		21200										
MONDEGO VELHO VA	NORTE	216,737	1808	4	1989	LNEC	27	36		18600	13 a)								já substituída	
				5	1989	LNEC	24	35		19550	7 a)									
				16	1989	LNEC	29	40		20150	22 a)	0,12	0	0,39	0,1	0,08	SIM			
MONDEGO VELHO VD	NORTE	216,737	1887	4	1989	LNEC	29	40		19850	50 a)	0,11	0	0,28	0	0,11	SIM		já substituída	
				7	1989	LNEC	29	46												
				6	1989	LNEC	26	43		20700										
MONTE DO TRIGO	NORTE	77,127	1881	7	1951	CP-GOB	23,8	34,9	14									substituída 1988		
MOURA	MORA	121,196	1807	TABULEIRO	1975	CP-GOB	25,2	34,8	14											
MURÇA	DOURO	162,046	1887	TABULEIRO	1990	CP-GOB	24,1	34,3	14											
MURTA VA	NORTE	224,741	1824	CONTRAV.	1976	CP-GOB	31,8	41,4	14											
				V.P.	1976	CP-GOB	29,8	38,2	14											
MURTA VD	NORTE	224,741	1895	CONTRAV.	1976	CP-GOB	28,6	41,4	14											

Figura 40 Tabela resumo informativa de ensaios DT (cedida por REFER)

A avaliação do estado de conservação do sistema de protecção também é importante na decisão de substituição por um revestimento novo ou de renovação parcial ou completa do esquema de pintura existente. Neste tipo de avaliação, é necessário distinguir os defeitos de pintura resultantes da aplicação, alguns dos quais não têm influência na durabilidade do sistema de protecção, daqueles originados por processos de degradação, que têm consequências na protecção da estrutura contra corrosão. Este tipo de defeitos inclui corrosão, empoamento, enferrujamento, fissuração, descamação, pulverulência e delaminação e são identificados, classificados e quantificados nas várias partes da norma NP EN ISO 4628 ^{[13]-[21]}. A Figura 41 mostra alguns exemplos de defeitos resultantes da degradação do esquema de pintura.

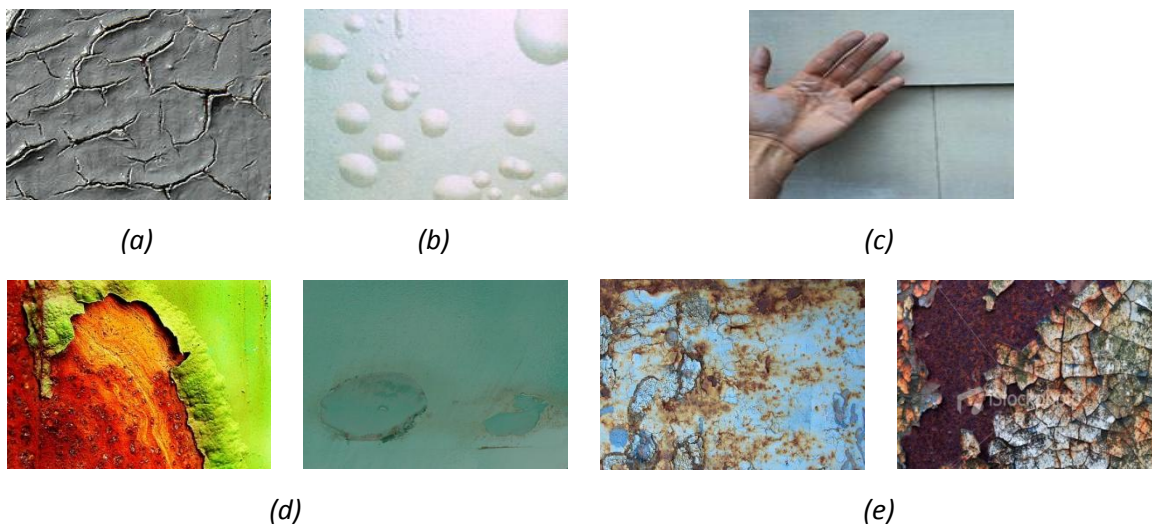


Figura 41 Defeitos por degradação das pinturas: (a) fissuração; (b) empolamento; (c) pulverulência; (d) descamação; (e) corrosão.

5. Métodos de reparação de pontes metálicas

A reparação adequada de uma ponte metálica requer uma avaliação prévia do elemento danificado, do tipo de dano e respectivas causas, da corrosividade do ambiente ao qual a estrutura está exposta, das características do material e do tipo e importância da estrutura.

Após esta avaliação, é então possível escolher o método ou a combinação de métodos mais apropriados à reparação do dano particular da estrutura. A seguir, estão descritos os métodos mais aplicados na reparação de pontes metálicas.

5.1 Esmerilamento

Esmerilamento é a designação comum dada a processos de desbaste que utilizam um elemento abrasivo como meio de remoção mecânica de material. O elemento abrasivo é composto por partículas abrasivas, com uma forma e número indefinido de pontos de corte, ligadas entre si por um agente ligante macio. Cada grão abrasivo tem um único ponto microscópico com um potencial bordo de corte. Esta técnica difere da técnica de corte na medida em que as peças removidas pelos grãos abrasivos são muito mais reduzidas.

Os processos de esmerilamento são normalmente aplicados em estruturas soldadas para modificação do perfil do metal fundido da junta, como técnica de optimização da resistência à fadiga. No entanto, o esmerilamento também é aplicado para reparar pequenas fendas de fadiga, pequenos entalhes e goivas e para alisar o metal fundido da junta, arestas, etc., antes do acabamento geral da preparação de superfície.

Relativamente à remoção de fendas de fadiga, o esmerilamento é mais adequado quando as causas são defeitos da soldadura ou descontinuidades (*web gaps*), mas também pode ser utilizada para causas como falta de fusão, zonas com defeitos de fissuração a frio, restrição de forças, vibração ou alterações geométricas^[10].

Enquanto técnica de melhoria da resistência à fadiga, os processos de esmerilamento podem ser incluídos no grupo de métodos para aperfeiçoamento da geometria das soldaduras. O objectivo destes métodos é remover os defeitos do metal de base, na concordância da junta soldada, melhorando o perfil da ligação e facilitando a transição entre o metal fundido da junta e o metal de base. Esta transição suave permite reduzir a tensão geométrica e aumentar o tempo de início da fissuração.

Na reparação de estruturas metálicas, especialmente no aperfeiçoamento da resistência à fadiga, os processos de esmerilamento mais aplicados (Figura 42) utilizam rebarbador e discos de esmeril.

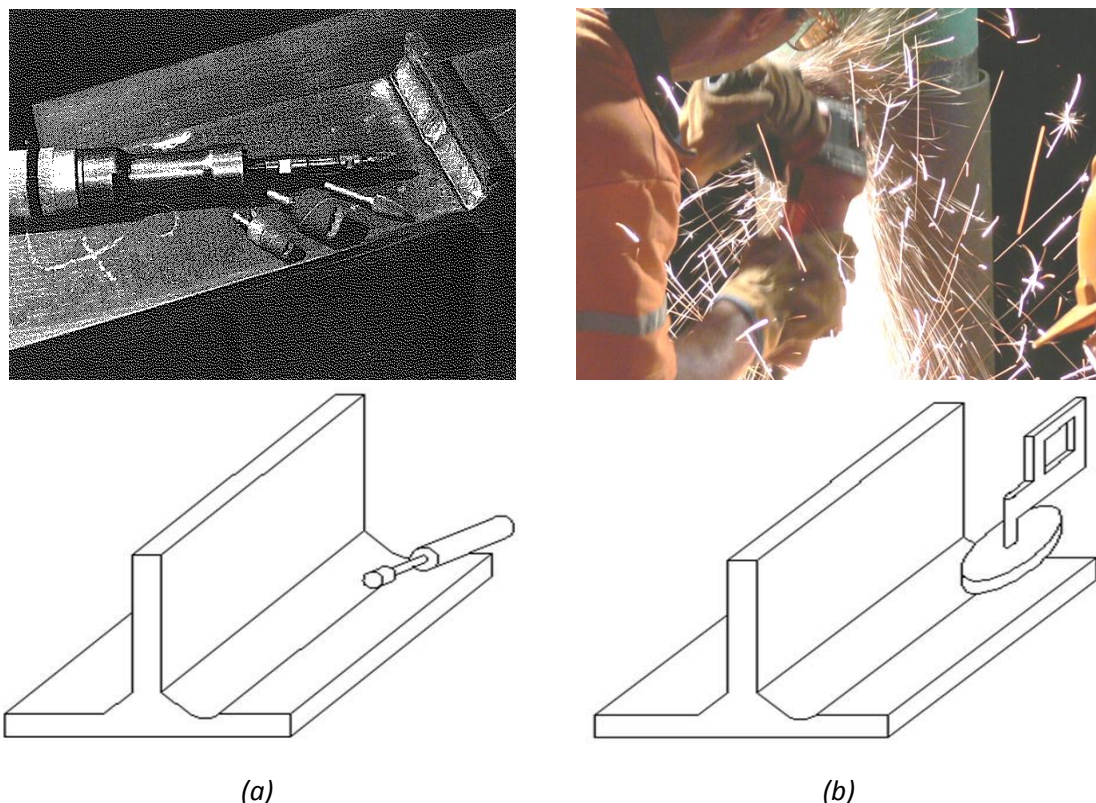


Figura 42 Métodos de esmerilamento: (a) com rebarbador; (b) com disco de esmeril (cedida por REFER)

5.2 Martelagem

Martelagem é geralmente um processo de trabalho a frio que deforma plasticamente um dado material através do impacto produzido por uma ferramenta ou partículas de metal. Este processo produz tensões residuais compressivas, benéficas para a superfície metálica, pelo processo de endurecimento.

Estas tensões compressivas pretendem substituir as tensões residuais de tracção, inerentes aos elementos soldados, que são prejudiciais devido à sua predisposição à fissuração. A substituição das tensões de tracção por compressivas vai promover um melhoramento do comportamento da estrutura à fadiga.

A deformação induzida pela martelagem também otimiza a geometria da junta soldada e facilita a transição entre o metal fundido da junta e o metal de base, reduzindo a concentração localizada de tensões.

As formas mais comuns de martelagem são ^[22]:

- Martelagem com martelo leve – Técnica manual que reduz a concentração localizada de tensões na concordância das juntas soldadas através da produção de uma grande quantidade de trabalho a frio e da alteração do ângulo e raio da junta soldada.

- Granalhagem – Operação de desbaste que proporciona um melhoramento considerável da força à fadiga das juntas soldadas. A extensão deste aperfeiçoamento depende do tipo de junta e limite de elasticidade do material.
- Martelagem com agulhas – Técnica similar à martelagem com martelo leve, mas utilizando uma ferramenta diferente.
- Martelagem por vibração ultra-sónica – Técnica recente que usa um martelo ultra-sónico para tratar a área ao longo da concordância das juntas soldadas. O mecanismo é similar à martelagem com martelo leve.

Este tipo de reparação é muito eficaz para reparar fissuras superficiais pouco profundas, que normalmente ocorrem na fronteira do metal fundido de juntas em filete, e para otimizar a resistência à fadiga das juntas soldadas. A martelagem é sobretudo aplicada em estruturas soldadas, oferecendo bons resultados para causas de fissuração por fadiga como falta de fusão, zonas com defeitos de fissuração a frio, restrição de forças, vibração e descontinuidades (*web gaps*)^[10].

A martelagem das camadas intermédias do metal fundido da junta também é considerada benéfica para a prevenção de fissuração e para reduzir as tensões de retracção e distorção. Este método de reparação só pode ser aplicado em juntas soldadas cujos elementos tenham uma espessura maior do que 22,5 mm e tem de respeitar todos os procedimentos específicos relativamente a ferramentas, áreas de aplicação, limites de temperatura e outros tratamentos intermédios^[23].

Durante o desempenamento a quente, a aplicação de martelagem leve também pode ser considerada, pois a introdução de tensões compressivas localizadas é benéfica à acção de desempenamento, através da redução da resistência do material^[24].

5.3 Refusão TIG

A refusão TIG é utilizada para refundir a região de concordância das juntas soldadas, com o objectivo principal de aumentar a resistência à fadiga destas juntas. Conforme referido por Kirkhope *et al.*^[22], este aumento resulta de um aperfeiçoamento da pormenorização, reduzindo o factor de concentração das tensões, e removendo inclusões de escórias e *undercuts*. O aperfeiçoamento da geometria de uma junta soldada com a refusão TIG pode resultar num aumento, para o dobro, da vida à fadiga^[25].

Esta descrição pode ser aplicada a outras técnicas de refusão da concordância de juntas soldadas, tais como a refusão plasma. A principal diferença entre a refusão TIG e plasma é o maior incremento de calor por parte da segunda, que produz um maior banho de fusão, resultando numa melhor transição entre o metal fundido da junta e o metal de base.

As principais vantagens destas técnicas são:

- ✓ Possibilidade de grandes melhorias;
- ✓ Pouco esforço físico exigido;
- ✓ Baixo custo.

A refusão TIG é relativamente barata, mas no entanto são necessários soldadores altamente qualificados e o equipamento pesado (Figura 43) e a acessibilidade limitada podem condicionar a sua aplicação. Uma outra desvantagem é a dificuldade em estabelecer um critério de inspecção capaz de garantir uma execução correcta dos trabalhos.

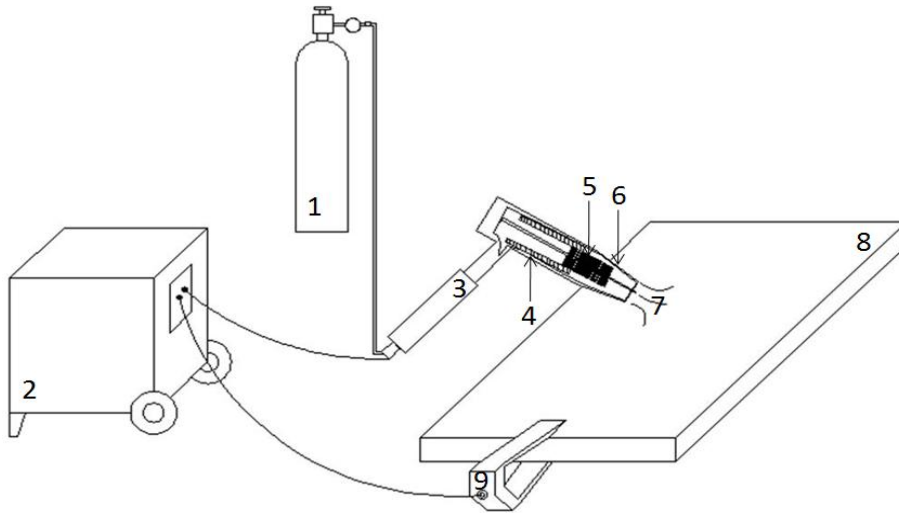


Figura 43 Equipamento para a refusão TIG: 1. Fornecimento de gás inerte; 2. Máquina de soldadura; 3. Porta-eléctrodo; 4. Condutor eléctrico; 5. Isolante (insulating heath); 6. Passagem de gás; 7. Gás de protecção; 8. Objecto a soldar; 9. Linha de terra

Além do aperfeiçoamento da pormenorização do metal fundido da junta, este método também pode ser utilizado para reparar fendas superficiais na concordância de juntas soldadas em filete.

A reparação da fissuração por fadiga com este método é quase exclusiva para estruturas soldadas. Podem-se obter bons resultados para causas como a falta de fusão, zonas com defeitos de fissuração a frio, restrição de forças, vibração e descontinuidades (*web gaps*)^[10].

5.4 Stop hole

O método *stop hole* consiste em fazer um furo próximo ou na ponta da fenda (Figura 44), de modo a reduzir a concentração localizada de tensões e prevenir a propagação da fissuração.

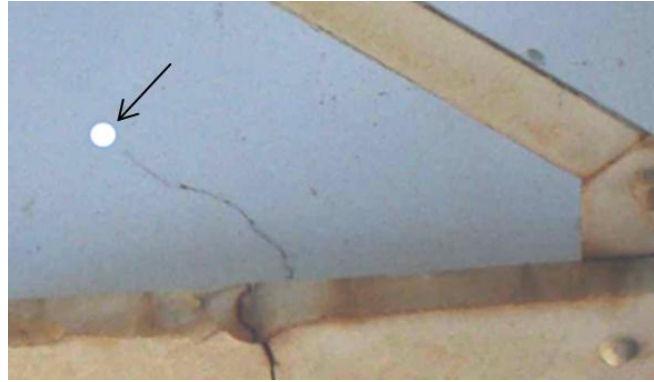


Figura 44 Localização do furo (“stop hole”) (cedida por REFER)

A eficácia desta técnica de reparação pode ser influenciada por diversos parâmetros, tais como:

- ✓ Dimensão, localização e acabamento da superfície do furo;
- ✓ Tipo e dimensão da fenda;
- ✓ Propriedades mecânicas do material;
- ✓ Tipo e magnitude da carga solicitante;
- ✓ Rácio de tensões.

De acordo com referências na literatura ^{[24][26][27]}, este método pode ser otimizado pela expansão a frio, por furos adicionais, ou por parafusos de alta resistência, rebites ou pinos.

O método *stop hole* é uma técnica de reparação simples, que normalmente é empregue para prolongar a vida à fadiga de elementos estruturais com fendas. Esta é uma técnica temporária ou de emergência, utilizada tanto em estruturas soldadas como aparafusadas ou rebitadas, que tem por objectivo atrasar a propagação de fendas. É ideal para pequenas fendas sujeitas a uma variação de tensões baixa em chapas ou componentes de chapas de elementos estruturais e para impedir a propagação de fendas maiores, desde que o comprimento restante dessas fendas seja reparado por chapas sobrepostas soldadas ou aparafusadas ^[25].

De acordo com Kühn *et al.* ^[10], nas estruturas soldadas, esta técnica tem bons resultados quando a fissuração por fadiga tem como causas a falta de fusão, zonas com defeitos de fissuração a frio, restrição de forças e deformação contínua por torção (*web breathing*). No entanto, também pode ser aplicada para causas como vibração, descontinuidades (*web gaps*) e alterações geométricas. Nas estruturas aparafusadas e rebitadas, este método tem excelentes resultados quando a causa da fissuração por fadiga é a deformação fora de plano, bons resultados em caso de tensões secundárias e resultados satisfatórios para concentrações localizadas de tensões.

5.5 Soldadura

A soldadura é um processo de junção de materiais que assegura a continuidade entre elementos metálicos através da fusão. De acordo com a norma ISO/TR 581:2005 ^[28], um material metálico é considerado soldável quando a continuidade metálica pode ser obtida utilizando procedimentos adequados para que a junta cumpra com os requisitos especificados relativamente às suas propriedades e respectiva influência na estrutura da qual faz parte integrante.

Uma vasta gama de processos de soldadura está disponível, diferindo nos seguintes parâmetros: temperatura, pressão e metal de enchimento. Com base na fonte de energia, estes processos podem ser classificados por:

- Gás;
- Arco (Figura 45);
- Resistência;
- Estado-sólido;
- Termoquímica;
- Energia radiante.

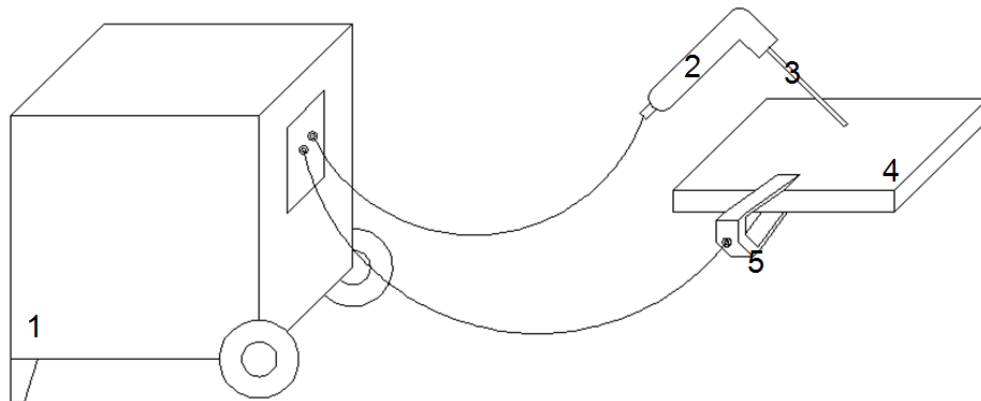


Figura 45 Soldadura por arco: 1. Máquina da soldadura por arco; 2. Porta-eléctros; 3. Eléctrodo; 4. Objecto a soldar; 5. Linha de terra.

A escolha de um processo específico depende de factores tais como as propriedades do metal, o tipo, localização e requisitos da junta, acessibilidade, projecto, desempenho e custo.

A soldadura envolve a transferência de uma grande quantidade de calor para o elemento que está a ser soldado. Este ciclo térmico é regulado pela distância entre cada ponto do elemento e a fonte de calor e produz alterações microestruturais no aço, afectando as suas propriedades. A metalurgia explica os princípios mais importantes e o impacto consequente dos processos de soldadura nas propriedades do aço.

Quando submetido a temperaturas acima da zona crítica, o aço sofre mudanças previstas pelos diagramas de equilíbrio. As transformações de fase, com a temperatura e o tempo, são traduzidas pelos diagramas da transformação isotérmica tempo-temperatura-transformação (TTT) e da transformação desse arrefecimento contínuo. A microestrutura e as propriedades da área soldada dependem das taxas de arrefecimento e são consequência directa de outros fenómenos que ocorrem durante a solidificação, incluindo reacções do estado-sólido e o efeito de inclusões não-metálicas.

A qualidade da soldadura é significativamente afectada pelas alterações metalúrgicas, que, por sua vez, estão dependentes de factores tais como as propriedades do material, procedimentos e parâmetros específicos do processo, nomeadamente:

- ✓ Corrente eléctrica e velocidade;
- ✓ Voltagem do arco;
- ✓ Velocidade de consumo do eléctrodo;
- ✓ Comprimento, diâmetro e geometria da junta;
- ✓ Forma do filete do metal fundido da junta;
- ✓ Profundidade de penetração;
- ✓ Velocidade de arrefecimento;
- ✓ Distorção.

Na reparação das estruturas soldadas, a soldadura pode ser utilizada para fendas e danos nas junta soldadas. Esta técnica também pode ser utilizada para reforçar ligações rebitadas ou elementos individuais, através da adição de chapas metálicas (Figura 46) ^[29].



Figura 46 Adição de chapas metálicas soldadas (cedida por REFER)

De acordo com Kühn *et al.* ^[10], a utilização da soldadura para reparação de danos relacionados com a fadiga é quase exclusiva para estruturas soldadas, mas também pode ser utilizada em estruturas rebitadas e/ou em ferro pudelado, após uma

avaliação da soldabilidade do metal. Nas estruturas soldadas, este tipo de reparação oferece bons resultados para problemas de fadiga resultantes de defeitos nas juntas soldadas (Figura 47), falta de fusão e zonas com defeitos de fissuração a frio. Para defeitos causados por restrição de forças, vibração, descontinuidades (*web gaps*) e deformação contínua por torção (*web breathing*), a soldadura não é o método de reparação mais adequado, mas também pode ser utilizado. Quanto às estruturas rebitadas, a soldadura é utilizada como reparação para problemas de fadiga resultantes de processos indevidamente executados de rebitagem.

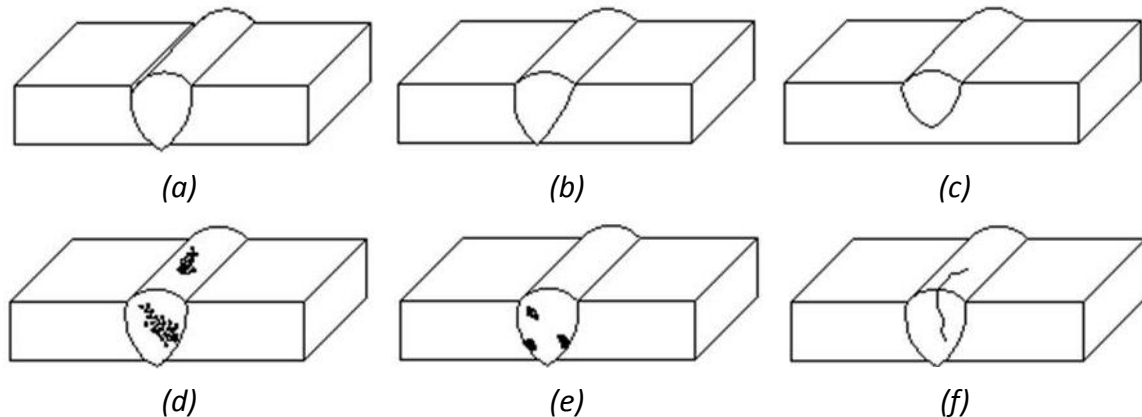


Figura 47 Defeitos típicos do metal fundido da junta: (a) undercut; (b) falta de fusão; (c) falta de penetração; (d) porosidade; (e) inclusões de escórias; (f) fendas.

5.6 Aparafusamento

Entre os métodos de fixação, o aparafusamento é o mais utilizado. De acordo com a norma EN 1090-2:2008^[30], as ligações aparafusadas consistem em parafusos, porcas e anilhas correspondentes (Figura 48). No entanto, só são utilizadas anilhas se forem necessárias para reduzir os danos locais nos revestimentos metálicos.

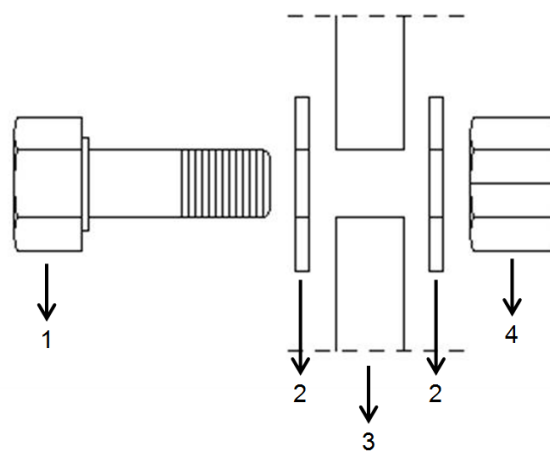


Figura 48 Ligação aparafusada: 1. Parafuso; 2. Anilhas; 3. Conjunto a fixar; 4. Porca

As ligações aparafusadas são caracterizadas pelo tipo de solicitação, perpendicular (ao corte) ou paralelo (à tracção) ao eixo do parafuso, e pelo modo de funcionamento, com ou sem pré-esforço. A integração destes critérios define cinco categorias que, segundo o Eurocódigo 3, são designadas de A a E. As categorias A, B e C destinam-se às ligações solicitadas ao corte, enquanto a D e E às solicitadas à tracção. A Tabela 5 mostra uma descrição sumária destas categorias.

Tabela 5 Categorias de ligações aparafusadas *(adaptado de [31])*

Categoria	Descrição	Crítérios	Tipo de solicitação	Classes de parafuso a aplicar ¹	Requisito de Pré-esforço
A	Resistente ao esmagamento	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Corte	4,6 a 10,9	Não
B	Resistente ao escorregamento no estado limite de utilização	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Corte	8,8 ou 10,9	Sim
C	Resistente ao escorregamento no estado limite último	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	Corte	8,8 ou 10,9	Sim
D	Não pré-esforçada	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Tracção	4,6 a 10,9	Não
E	Pré-esforçada	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Tracção	8,8 ou 10,9	Sim

Símbolos: Esforço de corte no estado limite último - $F_{v,Ed}$ | Resistência ao corte - $F_{v,Rd}$ | Resistência ao esmagamento - $F_{b,Rd}$ | Resistência ao corte no estado limite de utilização - $F_{v,Ed,ser}$ | Resistência ao escorregamento - $F_{s,Rd,ser}$ | Resistência plástica da secção transversal dos furos dos parafusos - $N_{net,Rd}$ | Esforço de tracção no estado limite último - $F_{t,Ed}$ | Resistência à tracção - $F_{t,Rd}$ | Resistência ao punçoamento - $B_{p,Rd}$

¹ Ver Tabela 6

Em ligações sem pré-esforço, normalmente são utilizados parafusos correntes sem aptidão para o pré-esforço, mas no entanto parafusos de alta resistência aptos ao pré-esforço também podem ser utilizados (Tabela 6). Nas ligações pré-esforçadas, os parafusos de alta resistência têm de estar em conformidade com os requisitos da norma EN 14399-1:2005 ^[32] e das normas específicas dos sistemas de parafusos e roscas HR e HV, respectivamente EN 14399-3:2005 ^[33] e EN 14399-4:2005 ^[34]. As normas de produto das anilhas dos sistemas HR e HV são, respectivamente, EN 14399-5:2005 ^[35] e EN 14399-6:2005 ^[36]. Os requisitos para a utilização de parafusos especiais, e.g. parafusos hexagonais de injeção, também estão incluídos na norma EN

1090-2:2008 ^[30]. As propriedades mecânicas e físicas dos parafusos e roscas em aço-carbono e em aço ligado estão especificadas na norma EN ISO 898-1:2009 ^[37].

Tabela 6 Valores nominais da resistência máxima f_{yb} e do esforço de tracção no estado limite último f_{ub} para parafusos ^(adaptado de [31])

Classe	4.6	4.8	5.6	6.8	8.8	10.9
f_{yb} [N/mm ²]	240	320	400	480	640	900
f_{ub} [N/mm ²]	400	400	500	600	800	1000

As ligações aparafusadas (Figura 49) requerem menos trabalho especializado do que a rebiteagem e a soldadura e, embora o preço dos parafusos de alta resistência seja maior do que o dos rebites, o custo total das ligações aparafusadas é menor, devido ao reduzido trabalho exigido, ao custo do equipamento e à quantidade de parafusos, que também são facilmente removidos se for necessário. As ligações aparafusadas também são mais resistentes à fadiga.

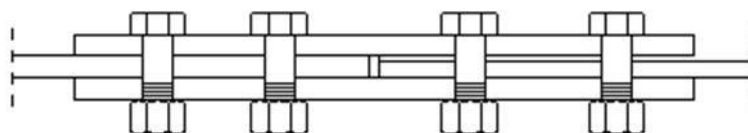


Figura 49 Ligação aparafusada

A reparação com parafusos normalmente segue os requisitos gerais especificados para a montagem de ligações aparafusadas em novas estruturas. Esta técnica é utilizada principalmente para substituir parafusos defeituosos em ligações aparafusadas, mas também pode ser aplicada em estruturas de ferro antigas com baixa soldabilidade e para substituir rebites em ligações rebiteadas. A vantagem principal de substituir rebites danificados por parafusos prende-se com o menor custo, mas o incremento de resistência na ligação é nulo. Geralmente, é preferível substituir rebites por outros rebites para manter a uniformidade.

As ligações por parafusos pré-esforçados são consideradas excelentes, por Kühn *et al.* ^[10], para reparações de fissuração por fadiga devido a fissuras resultantes da mandrilagem e a chapas de conexão demasiado finas. No entanto, também é indicada como satisfatória para causas como processos indevidamente executados de rebiteagem ou erros de pormenorização.

De acordo com as linhas orientadoras de um relatório de um programa de investigação americano dedicado a auto-estradas ^[38], a reparação de fendas em elementos estruturais críticos deve ser mais conservadora e executada com chapas sobrepostas aparafusadas e reforçadas, no caso de serem utilizados mais métodos de reparação.

5.7 Rebitagem

A rebitagem é um método utilizado para unir componentes metálicos de elementos estruturais com rebites. Um rebite é composto por uma barra metálica cilíndrica, designada por haste, com uma cabeça numa extremidade. Os rebites são conduzidos por furos previamente executados nos elementos a unir e, na outra extremidade, uma segunda cabeça é formada por ferramentas específicas (Figura 50).

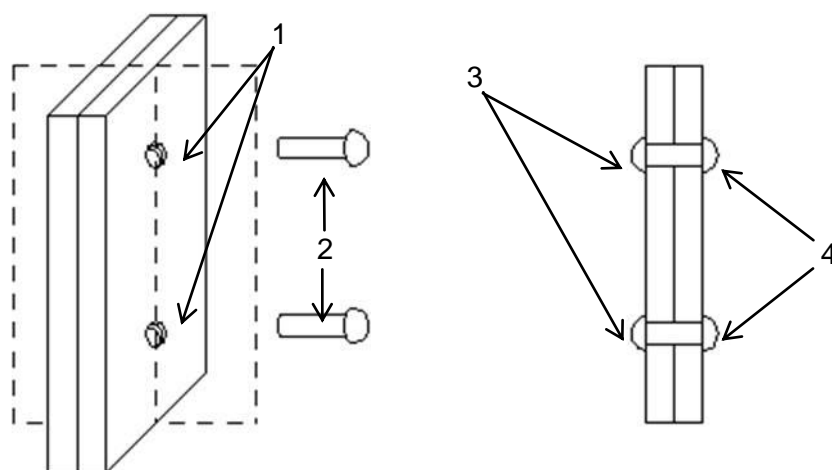


Figura 50 Ligação rebitada: 1. Furos dos rebites; 2. Rebites quentes; 3. Cabeças formadas; 4. Cabeças marteladas

A cabeça do rebite pode ter diferentes formas (Figura 51), mas a forma mais utilizada no aço estrutural é a cabeça tipo *snap*. De acordo com a norma EN 1090-2:2008^[30], o rebite deve ter comprimento suficiente para formar uma cabeça de dimensões uniformes, preencher completamente o furo e evitar deformações superficiais nas faces exteriores das chapas. As cabeças de rebite embutidas devem preencher completamente o furo escareado após a rebitagem.

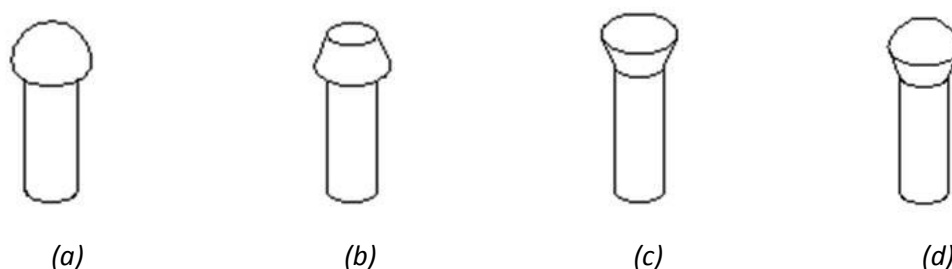


Figura 51 Tipos de rebites: (a) cabeça tipo "snap"; (b) cabeça tipo "pan"; (c) cabeça embutida plana; (d) cabeça embutida redonda

Os rebites quentes devem cumprir com as normas de produto específicas que devem estar indicadas nos anexos nacionais. As normas NP EN 1993-1-8:2010^[31] e EN 1090-2:2008^[30] especificam, respectivamente, o dimensionamento e os requisitos técnicos para a instalação de rebites.

As ligações rebitadas podem ser classificadas de acordo com o arranjo das chapas e rebites. As chapas podem estar sobrepostas (junta sobreposta) ou unida pelo topo (junta a topo) (Figura 52). Nas juntas a topo, a ligação é feita com chapas de cobertura num ou em ambos os lados do elemento estrutural. Ambos os tipos de junta podem ter apenas uma fila, serem alternados ou rebitados em cadeia.

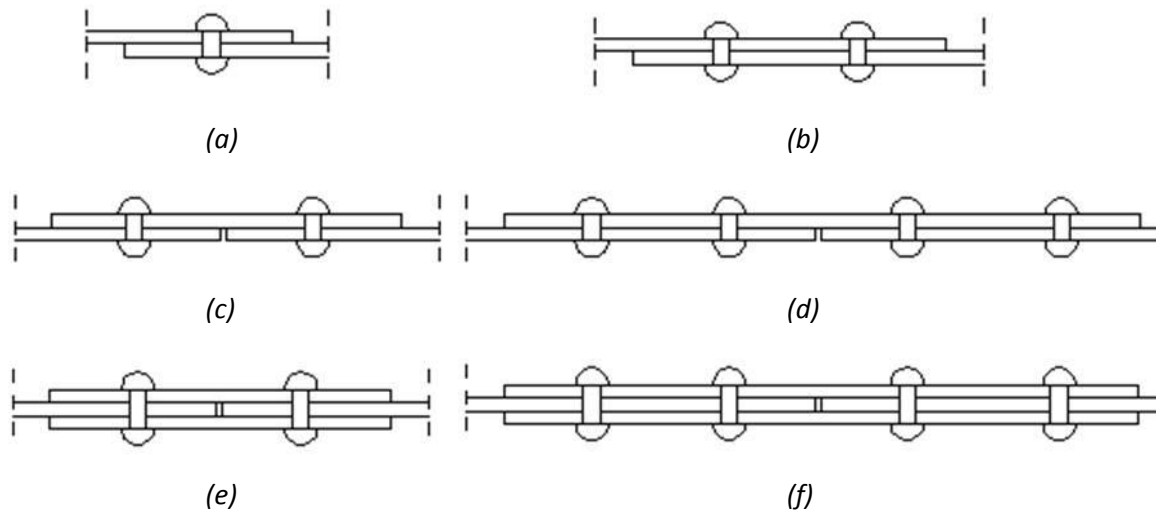


Figura 52 Tipos de juntas rebitadas: (a) junta sobreposta, com solicitação ao corte único; (b) com solicitação ao corte duplo; (c) junta a topo, com uma chapa de cobertura e rebite em fileira única; (d) junta a topo, com uma chapa de cobertura e rebite em fileira dupla; (e) junta a topo, com duas chapas de cobertura e rebite em fileira única; (f) junta a topo, com duas chapas de cobertura e rebite em fileira dupla

Este tipo de ligação também pode ser classificado pelo modo de transmissão ou pelo tipo de solicitação das cargas, que pode ser perpendicular (ao corte) ou paralelo (à tracção) ao eixo do rebite ou, então, uma combinação destes dois (Figura 53). O carregamento é transmitido através do apoio entre as chapas e a haste ou cabeça do rebite, com o rebite a ser solicitado ao corte ou à tracção. Além da resistência ao esmagamento dos rebites nos elementos unidos, existe também uma força de fricção causada pelo travamento da rebiteagem a quente. Embora esta força seja ignorada na análise ou dimensionamento de ligações, também contribui para a resistência ao escorregamento da junta.

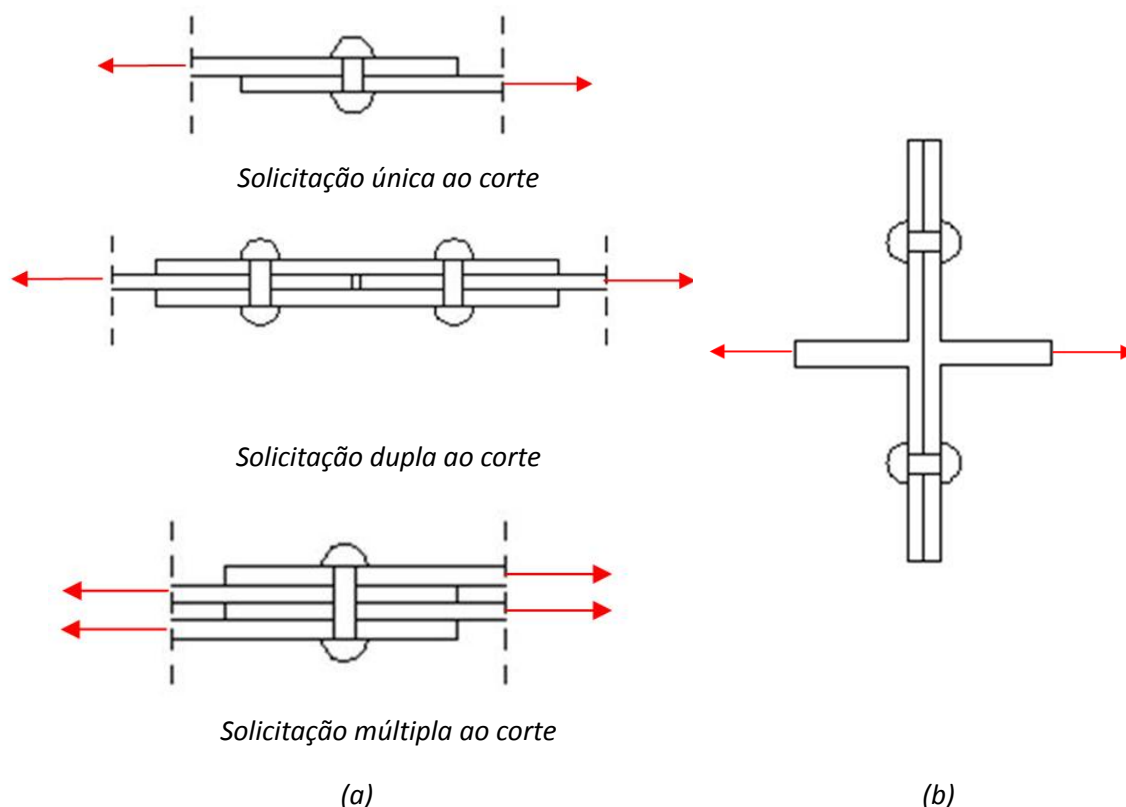


Figura 53 Tipos de solicitação nas ligações rebitadas: (a) rebites solicitados ao corte; (b) rebites solicitados à tração

As ligações rebitadas (Figura 54) foram amplamente utilizadas no séc. XIX e no início do séc. XX. No entanto, este processo tornou-se obsoleto com o desenvolvimento da soldadura e dos parafusos de alta resistência.



Figura 54 Ligação rebitada (cedida por REFER)

Actualmente, a rebitagem apenas é utilizada em trabalhos de reabilitação como a reparação e reforço de estruturas antigas rebitadas. A reparação por rebitagem é utilizada para substituir rebites defeituosos ou ligações rebitadas completas.

5.8 Adição de componentes metálicos

A adição de componentes metálicos (Figura 55), tais como cantoneiras, chapas *gusset* aparafusadas e chapas de cobertura, de enchimento, ou sobrepostas, é uma técnica de reparação simples e de baixo custo que é vulgarmente usada para restaurar as condições iniciais, através do reforço, de um elemento estrutural danificado.

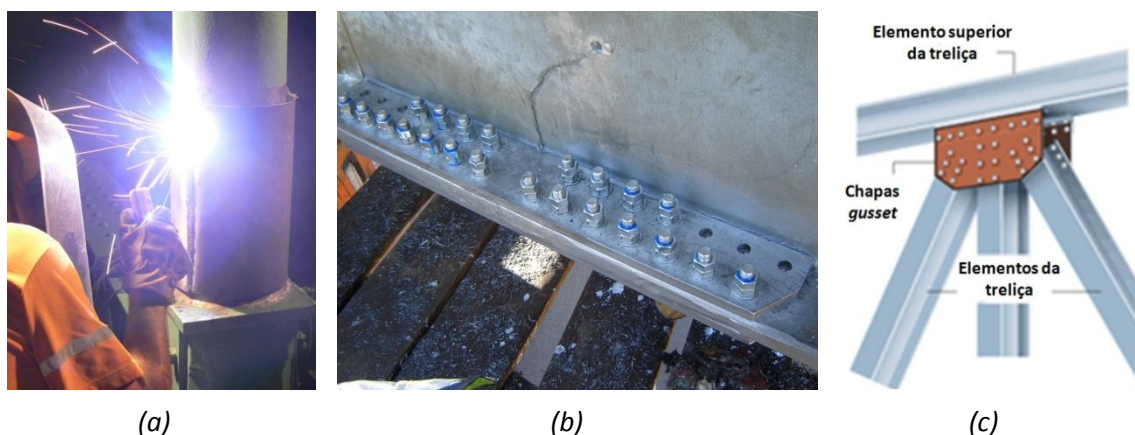


Figura 55 Exemplos de chapas de reforço: (a) Chapas soldadas; (b) Chapas sobreposta aparafusadas; (c) Chapas gusset aparafusadas (cedidas por REFER)

Além do reforço de elementos estruturais, os componentes metálicos são frequentemente utilizados para reforçar ou fazer ponte de secções danificadas por corrosão ou colisões e para reparar fendas causadas por fadiga ou sobrecargas.

De acordo com Kühn *et al.* ^[10], em elementos fissurados por fadiga em estruturas soldadas, a adição de chapas metálicas oferece bons resultados para causas como defeitos no metal fundido da junta, falta de fusão, restrição de forças, vibração e alterações geométricas. A utilização de chapas sobrepostas aparafusadas é considerada excelente para causas como defeitos no metal fundido da junta, falta de fusão, zonas com defeitos de fissuração a frio, restrição de forças e alterações geométricas. Nas estruturas soldadas e rebitadas, esta técnica de reparação também é considerada excelente para causas como fissuras devidas à mandrilagem ou localizadas na secção bruta (*gross cross section*), e tem bons resultados quando as causas são processos indevidamente executados de rebiteamento ou erros de pormenorização.

Esta técnica de reparação é normalmente utilizada para fendas cuja profundidade excede a capacidade de penetração da refusão TIG ou a eficácia da martelagem ou do esmerilamento.

5.9 Substituição total ou parcial de elementos estruturais

A substituição parcial de um elemento estrutural essencialmente consiste na remoção da área danificada desse elemento e substituição com inserção de nova parte por soldagem, aparafusamento ou rebiteamento, enquanto a substituição total consiste na substituição completa do elemento (Figura 56).

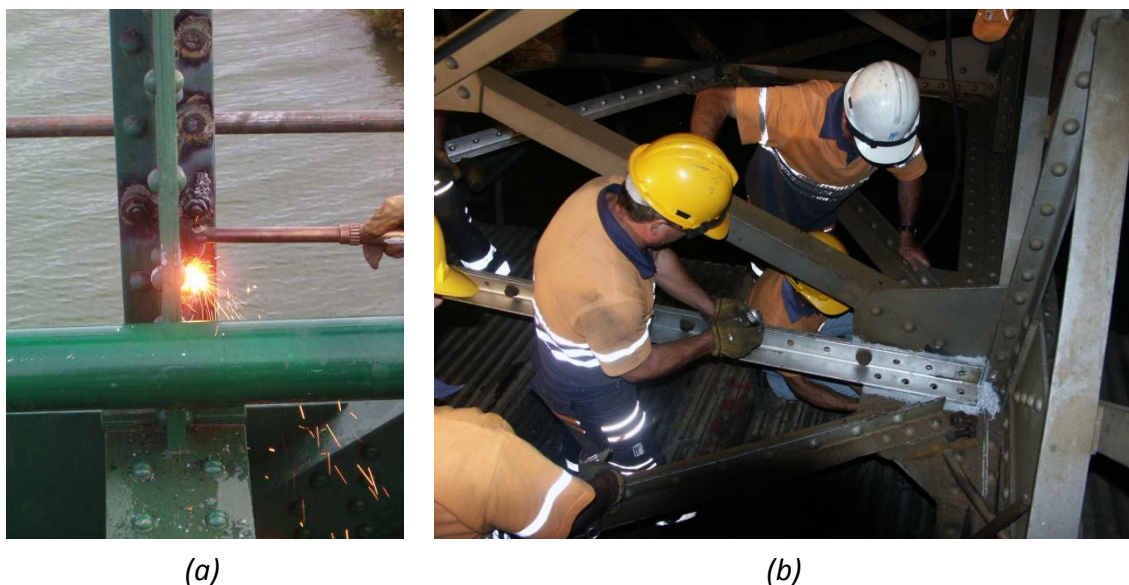


Figura 56 Substituição de elementos: (a) Substituição parcial; (b) Substituição total ^(cedida por REFER)

A substituição parcial é normalmente aplicada em elementos com elevada deterioração por corrosão ou por mecanismos físicos ou em elementos com deformações críticas causadas por acidente. A substituição total pode ser economicamente justificada quando estes danos são demasiado extensos.

5.10 Desempenamento mecânico

Esta técnica de reparação consiste na aplicação de forças externas a um elemento deformado de modo a induzir deformação plástica contrária à deformação apresentada pelo elemento estrutural.

O desempenamento mecânico pode ser aplicado a um elemento estrutural *in situ* ou após a sua remoção da estrutura, o que normalmente acontece quando as deformações são relativamente grandes. Esta situação requer a reinstalação do elemento na estrutura após a aplicação do desempenamento mecânico.

O tipo específico de desempenamento mecânico depende da dimensão e localização da deformação e da dimensão do elemento estrutural. De acordo com a espessura das chapas de aço, deve ser escolhido equipamento e ferramentas mecânicas adequadas [39].

Esta técnica de reparação é utilizada para reparar elementos estruturais deformados através da acção do desempenamento a frio e só deve ser aplicada quando os limites de deformação permitidos são excedidos. Neste caso, o elemento estrutural deve ser reparado e um novo sistema de protecção contra a corrosão aplicado. No entanto, se estas deformações forem demasiado grandes, o elemento estrutural deve ser substituído, conforme descrito na Secção 5.9.

Tabela 7 Deformação permitida a elementos estruturais de pontes em aço (adaptado de [39])

Tipo de deformação	Valores limite para a reparação
Empenamento (<i>camber deformation</i>) na zona compressiva de vigas de alma cheia.	Até 1/1000 do comprimento total do empenamento (<i>bend</i>) medido ao longo da corda (<i>chord</i>).
Empenamento na zona traccionada de vigas de alma cheia.	Até 1/500 do comprimento total do empenamento medido ao longo da corda.
Encurvamento (<i>bend deformation</i>) das chapas de cobertura de vigas de alma cheia.	Quando $f \leq s$ – máximo do empenamento a não é limitado; Quando $a \leq b/4$ – máximo do empenamento a não é limitado.
Abaulamento (<i>bulging</i>) da malha estrutural na zona compressiva de vigas de alma cheia sem fissuras.	Quando $\Phi < 0,2 h$ e $d < g$.
Abaulamento da malha estrutural na zona traccionada de vigas de alma cheia sem fissuras.	Quando $\Phi < 0,1 h$ e $d < g$.
Empenamento de elementos à compressão de vigas em treliça.	Até 1/1000 do comprimento do elemento medido entre as margens externas e as chapas <i>gusset</i> .
Empenamento de elementos à tracção de vigas em treliça.	Até 1/500 do comprimento do elemento medido como anteriormente.
Deformação torsional de elementos secundários de vigas principais ou elementos de contraventamento de vigas em treliça, com as condições das duas linhas acima a serem cumpridas.	Quando $\beta < 1^\circ$ em elementos à tracção; Quando $\beta < 0,5^\circ$ em elementos à compressão.
Empenamento de chapas de reforço de vigas em treliça.	Quando $f \leq s$ – máximo de empenamento a não é limitado; Quando $a \leq b/4$ – máximo de empenamento a não é limitado.

f – altura máxima de empenamento (*bend*) da flange | s – profundidade total da chapa de cobertura | a – espessura de empenamento da flange | b – espessura da chapa de cobertura, medida da malha até à margem da flange | Φ – diâmetro do abaulamento (*bulging*) | h – altura da secção transversal de vigas de alma cheia | d – peso do abaulamento | g – Espessura da malha estrutural (*web*) | β – ângulo de torção, medido ao longo de cada metro do elemento estrutural.

5.11 Desempenamento por calor

O processo de desempenamento por calor envolve a aplicação controlada e padronizada de aquecimento e arrefecimento a zonas de aço plasticamente deformadas, de modo a proceder a um desempenamento gradual do material^[40]. Este método é baseado na plasticidade do aço após o seu limite de elasticidade e na sua expansão, a uma taxa previsível promovida pelo calor, com conseqüente decréscimo do seu limite de elasticidade a altas temperaturas.

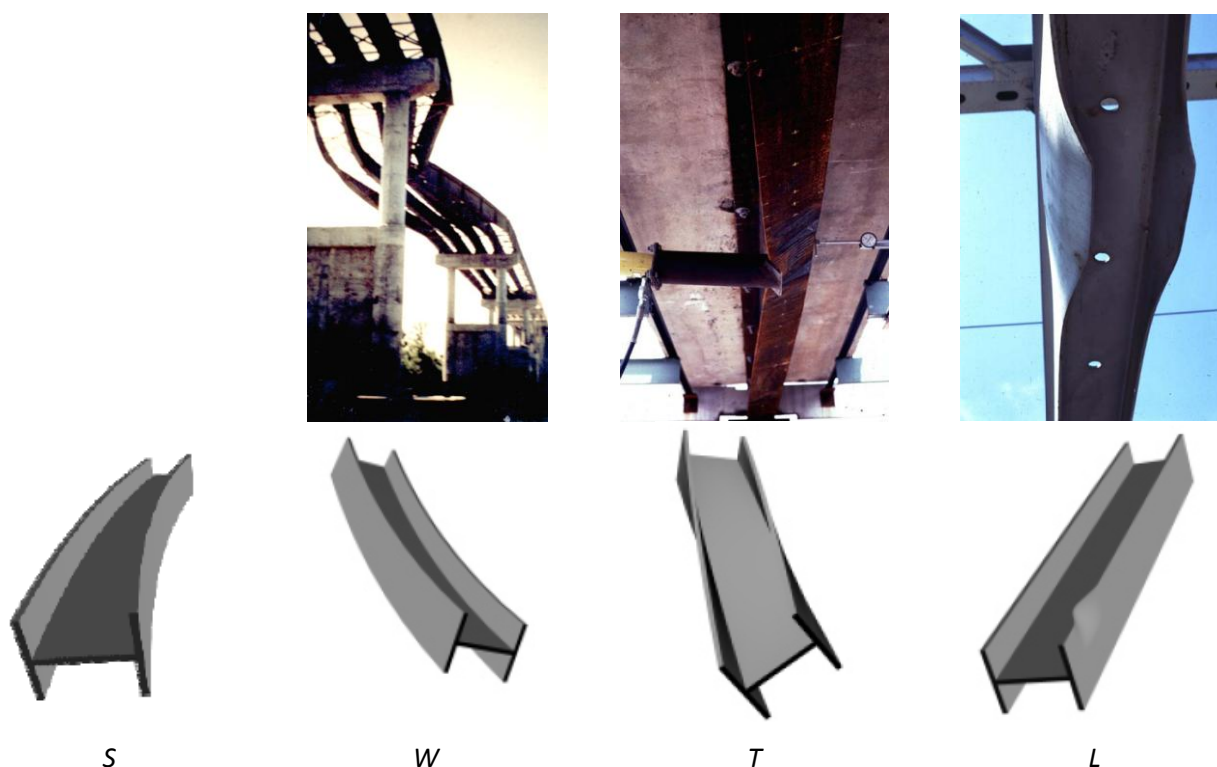
Este processo é principalmente influenciado pelos seguintes factores:

- Selecção do padrão e sequência de aquecimento;
- Controlo da temperatura de aquecimento, taxa de aquecimento e arrefecimento;
- Aplicação de restrições.

O desempenamento por calor é utilizado em aço danificado cujo limite de elasticidade foi excedido, normalmente devido a:

- ✓ Danos causados pelo impacto de veículos ou detritos;
- ✓ Distorção provocada durante a construção;
- ✓ Movimentos da subestrutura ou da estrutura de suporte;
- ✓ Fogos, explosões e terremotos.

Para avaliar a aplicabilidade específica do desempenamento por calor, é essencial avaliar a condição da estrutura, a causa, o tipo e a gravidade do dano (Figura 57), a presença de fracturas, as propriedades do material e respectivos efeitos da reparação e a acessibilidade.



- S* – danos resultante de flexão sobre o eixo “forte” ou maior;
W – danos resultante de flexão sobre o eixo “fraco” ou menor;
T – danos resultante de torção sobre o eixo longitudinal;
L – danos de natureza localizada.

Figura 57 Categorias fundamentais de danos ^(adaptado de [41])

5.12 Polímeros reforçados com fibras de elevada resistência (FRP)

FRP (*Fibre Reinforced Polymers*) são compósitos de polímeros reforçados com fibras, geralmente fabricados em perfis pultrudidos ou construídos a partir de chapas finas pré-impregnadas que são aplicadas como reforço externo, proporcionando um aumento da resistência e rigidez da estrutura. As propriedades de um compósito dependem do método de fabricação, tipo de fibra utilizada, fracção volumétrica e orientação.

As vantagens em utilizar FRP são:

- ✓ Elevada resistência e rigidez;
- ✓ Leveza do material;
- ✓ Propriedades excelentes de resistência à fadiga e fluência;
- ✓ Manuseamento e transporte fácil;
- ✓ Boa resistência à deterioração ambiental;
- ✓ Pouca carga adicionada;
- ✓ Impacto visual mínimo.

As principais desvantagens são:

- ✓ Intolerância a superfícies com uma colagem irregular;
- ✓ Eventual descolagem em modo de ruptura frágil;
- ✓ Altos custos, embora sendo considerado um método de custo eficaz.

Este método pode ser utilizado para reparar elementos danificados devido a causas ambientais relacionadas com mecanismos de deterioração físicos e/ou químicos, possibilitando o aumento da durabilidade e a vida à fadiga da estrutura e o reforço de elementos estruturais. No entanto, embora com ampla aplicação noutras indústrias, este tipo de compósito tem uma aplicação recente na construção, principalmente nas estruturas metálicas, o que levanta várias questões, particularmente relacionadas com a durabilidade.

Em caso de reparação de fissuração por fadiga, a utilização do método FRP é mais adequada para estruturas aparafusadas ou rebitadas. É possível obter bons resultados para causas como ^[10] processo de rebiteamento defeituoso, fendas na secção bruta (*gross cross section*), deformações fora-de-plano, tensões secundárias e erros de pormenorização.

Os tipos de fibras mais utilizados pelo método FRP na reparação de estruturas são indicados na Tabela 8, sendo as fibras de carbono (CFRP) as mais aplicadas. De acordo com a literatura ^[42], o reforço por CFRP pode aumentar a vida à fadiga de uma estrutura em até mais de 20 vezes, sendo muito eficiente na prevenção da fissuração.

Tabela 8 Propriedades de fibras normalmente utilizadas em estruturas metálicas ^(adaptado de [43])

Fibras utilizadas	Propriedades				
	Peso específico	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à tracção [MPa]	Deformação máxima [%]	Coefficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]
Carbono de ultra alto módulo	2,12	620–935	3600–3700	0,6	–
Carbono de alta resistência	1,80	230	3400	1,48	–1,0 a +0,4
Carbono de alto módulo	1,80	390	2900	0,74	–1,0 a +0,4
Aramida Kevlar® 49	45	130	3000	2,3	–5,2
Vidro (<i>e-glass</i>)	2,56	70			

6. Métodos de protecção dos elementos metálicos

Existe uma grande variedade de sistemas de protecção contra a corrosão de estruturas metálicas, que devem ser seleccionados de acordo com a especificação dos requisitos. Os sistemas de protecção mais económicos são os esquemas de pintura e os revestimentos metálicos, ou a combinação de ambos, o sistema “duplex”. Geralmente, a protecção por pintura é mais económica inicialmente, mas no entanto as condições de exposição e os custos da manutenção devem ser bem ponderados. Uma outra possibilidade, para condições de imersão ou enterradas, é a protecção catódica, com ou sem aplicação de revestimento. A aplicação de protecção catódica com revestimento exige um sistema de revestimento não saponificável. No projecto de uma estrutura, em vez de optar pela aplicação de sistemas de protecção por pintura do aço, pode-se ponderar a utilização de ligas mais resistentes ou de outros métodos de protecção.

6.1 Protecção catódica

6.1.1 Generalidades

O conceito de protecção catódica está relacionado com a estabilidade termodinâmica das espécies, genericamente representada em diagramas de potencial pH. A corrosão do metal pode ser prevenida através da mudança do seu potencial de uma condição de estado activo, onde os produtos de corrosão são uma espécie activa, para valores dentro da região de imunidade, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 58.

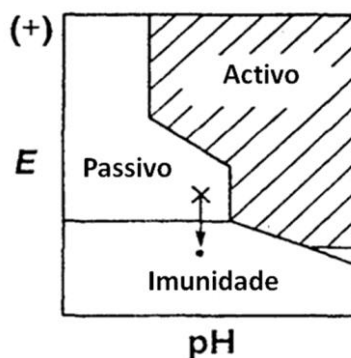


Figura 58 Diagrama de potencial pH: representação esquemática do conceito de protecção catódica, com regiões activa, passiva e de imunidade

Então, o processo da protecção catódica consiste essencialmente na redução do potencial do metal a proteger. Esta situação ocorre com o aumento da densidade de corrente catódica, que também aumenta a sua taxa de dissolução.

O critério da protecção catódica consiste na redução do potencial das ligas para valores indicados na Tabela 9, de maneira a que a taxa de corrosão seja menor que 0,01 mm/ano. No entanto, em alguns casos, o potencial do metal não pode ser mais negativo que um certo valor limite crítico, de modo a minimizar efeitos prejudiciais,

tais como danos em revestimentos e fissuração do metal por fragilização pelo hidrogénio.

Tabela 9 Potenciais de protecção de materiais de aço não ligados ou de baixa liga, no solo, na água doce e na água do mar ^(adaptado de [44])

Metal ou liga	Meio		Potencial de protecção
Materiais Fe não ligados ou de baixa liga, com $YS \leq 800 \text{ N.mm}^{-2}$	Água e solo Condições aeróbicas	T < 40°C	-0,85 ^(a)
		T > 60°C	-0,95 ^{(a)(b)}
		Solo arenoso arejado 100 < ρ < 1000 Ωm	-0,75
		Solo arenoso arejado $\rho > 1000 \Omega\text{m}$	-0,65
	Água e solo Condições anaeróbicas		-0,95
<p>NOTA 1: Todos os potenciais referem-se a um eléctrodo de referência de sulfato de cobre/cobre saturado, $E_{Cu} = E_H - 0,32 \text{ V}$.</p> <p>(a) Para temperaturas entre 40 e 60°C, a protecção do metal pode ser interpolada.</p> <p>(b) Aumentando o risco de fissuração devido a tensões de corrosão induzidas por NaOH com o aumento da temperatura.</p>			

Em estruturas complexas, nem sempre é possível determinar por medição se os critérios da protecção catódica são cumpridos. Podem então ser escolhidos métodos alternativos de verificação, que são especificados na norma EN 14505:2005 ^[45], nomeadamente:

- Método de medição do potencial – O potencial, quando a corrente de protecção está ligada, deve ter um valor igual ou mais negativo do que -1,2V em condições específicas, excepção feita onde ocorre entrada de corrente e perto de grandes cátodos externos, onde valores mais negativos do que -0,8V podem ser aceites.
- Método de medição da corrente – A entrada de corrente na estrutura pode ser demonstrada directamente ou através da medição da densidade de corrente ou da mudança de potencial medida por meio de eléctrodos. Por exemplo, pode ser dada indicação ao ocorrer mudança negativa do potencial de corrosão de, pelo menos, 0,3V, quando a corrente de protecção está ligada.
- Método de medição da despolarização – Uma mudança positiva, nas sondas de teste, de pelo menos 0,1V, medida uma hora após a desconexão da estrutura, indica que a estrutura está polarizada.

De acordo com a norma EN 14505:2005 ^[45], pelo menos um destes critérios deve ser aplicado. No entanto, provavelmente é necessária a aplicação de mais do que um critério para verificar a protecção adequada de estruturas complexas.

Uma distribuição adequada da corrente de protecção sobre a estrutura assegura a uniformidade de potencial essencial à protecção catódica. A corrente exigida para alcançar o critério de protecção depende do tipo e das características da estrutura e das condições ambientais às quais a estrutura está exposta.

De acordo com a norma EN 12473:2000 ^[46], especialmente na água do mar, os principais factores que afectam os requisitos da densidade da corrente são a salinidade, o pH, a temperatura, a profundidade e o fluxo da água. Estes factores afectam directamente o teor de oxigénio dissolvido, os depósitos de calcário e a contaminação marinha, que influenciam a taxa de corrosão e, conseqüentemente, os requisitos da protecção catódica. A corrente catódica é considerada como proporcional à taxa de difusão de oxigénio dissolvido no substrato de aço. Então, os requisitos de densidade de corrente aumentam com o aumento das correntes do mar, e decrescem com o aumento da salinidade, dos depósitos de calcário e da contaminação marinha. A temperatura, profundidade e pH têm efeitos complexos na limitação dos requisitos de densidade de corrente para a protecção catódica.

Cada situação prática é abordada por diferentes normas, que fornecem recomendações e orientações. Por exemplo, a norma EN 13174:2001 ^[47] fornece orientação para a protecção catódica em instalações portuárias. A Tabela 10 fornece os valores orientadores das densidades de corrente para a protecção do aço.

Tabela 10 Valores orientadores para o dimensionamento da densidade de corrente para protecção de aço nu em lama salina e em água do mar ^(adaptado de [47])

Ambiente	Descrição	Condições	Densidades de corrente (mA.m ⁻²)		
			Inicial	Manutenção	Repolarização
Lama salina	Todos os tipos de estruturas		25	20	20
Água do mar	Condições estáticas ou semi-estáticas com um fluxo de maré < 0,5 m/s	Em águas pouco arejadas	80 a 100	50 a 65	60 a 80
		Em águas bem arejadas	120 a 150	65 a 80	80 a 100
	Condições estáticas ou semi-estáticas com um fluxo de maré > 0,5 m/s	Em águas pouco arejadas	120 a 150	60 a 80	80 a 100
		Em águas bem arejadas	170 a 200	80 a 100	100 a 130

A protecção catódica pode ser alcançada tanto por ânodos com corrente imposta ou por ânodos de sacrifício ou galvânicos (Figura 59). A protecção catódica por ânodos com corrente imposta consiste no fornecimento da corrente de protecção por uma fonte externa de energia, em conjunto com a utilização de ânodos relativamente inertes. A protecção catódica por ânodos de sacrifício consiste na utilização de um metal menos nobre, com um potencial de corrosão mais negativo que o do aço, e.g. alumínio, zinco, ligas de magnésio. Uma outra forma de proporcionar protecção catódica é através de sistemas híbridos, que incluem ânodos com corrente imposta e galvânicos.

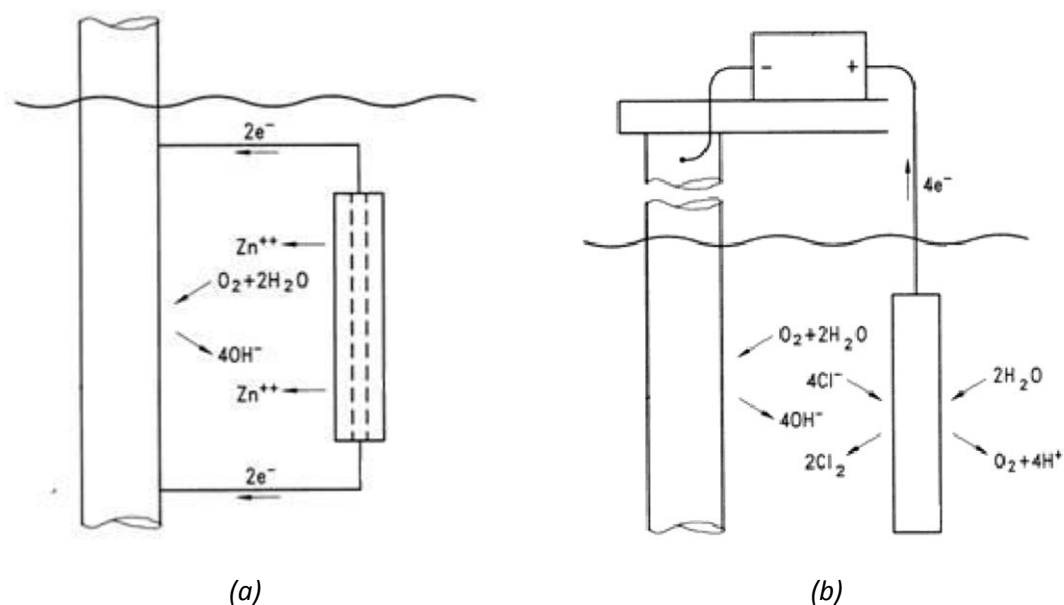


Figura 59 Representação dos sistemas de protecção catódica em água do mar: (a) galvânico; (b) corrente imposta ^(adaptado de [46])

6.1.2 Sistemas de protecção catódica

Os ânodos com corrente imposta podem ter uma configuração distribuída ou contínua, com os ânodos colocados, respectivamente, em pequenos intervalos ao longo da estrutura ou num aterro com enchimento de grafite contínuo com intervalos adequados. De acordo com a norma EN 14505:2005 ^[45], os ânodos com corrente imposta contínuos proporcionam uma distribuição de corrente uniforme ao longo da estrutura, com menos consumo de corrente e necessidade de produção de voltagem. Este tipo de protecção catódica normalmente evita problemas de interferência na distribuição da corrente de protecção.

Nos sistemas de ânodos de sacrifício, a produção de voltagem resulta da diferença de potencial entre os dois metais, que produzem uma célula galvânica quando estão ligados um ao outro num electrólito. Esta ligação induz a corrosão do metal mais activo e protecção do mais nobre, onde o ânodo é o material menos nobre, que é consumido na interacção galvânica, e o metal estrutural, com o potencial mais positivo, é o

cátodo, que é protegido como resultado da corrente galvânica. Nos sistemas de ânodos de sacrifício, o potencial do par galvânico depende dos seguintes factores:

- ✓ Parâmetros electroquímicos;
- ✓ Dimensões relativas das áreas anódicas e catódicas;
- ✓ Distância relativa entre as áreas anódicas e catódicas;
- ✓ Condições ambientais;
- ✓ Características do revestimento;
- ✓ Velocidade do fluido.

Os sistemas de protecção catódica podem ser utilizados conjuntamente com um sistema de revestimento adequado, que tem um efeito de redução da densidade de corrente e melhora a distribuição de corrente sobre a superfície. A selecção do sistema de revestimento depende do tipo de estrutura, das condições do ambiente e do custo.

No dimensionamento deste tipo de sistema de protecção é preciso tomar em consideração alguns efeitos adversos da protecção catódica, que podem limitar a utilização dos sistemas de revestimento. Nos revestimentos do tipo óleo-resinoso ou alquídico, por exemplo, tais efeitos adversos devem-se à saponificação, nos primários de polivinil butiral, decorrem da perda de adesão, e alguns revestimentos contendo alumínio podem ser atacados por álcalis.

O revestimento actua como uma barreira resistente ao fluxo da corrente, que é limitada às micro-porosidades na superfície pintada, reduzindo os requisitos de densidade da corrente. Desta forma, é introduzido um factor relativo a falhas no revestimento, f_c , que é considerado na redução da densidade de corrente catódica. Este factor, que depende de eventuais danos mecânicos e do envelhecimento, varia entre 0 e 1, que correspondem, respectivamente, a um revestimento isolante perfeito e a uma estrutura sem revestimento. Então, a densidade da corrente de protecção para estruturas com revestimento é dada pela equação (1),

$$J_c = J_b \cdot f_c, \quad (1)$$

onde

J_c – densidade da corrente de protecção para aço com revestimento ($A \cdot m^{-2}$),

J_b – densidade da corrente de protecção para aço sem revestimento ($A \cdot m^{-2}$),

f_c – factor relativo a falhas no revestimento.

A norma EN 13174:2001^[47] fornece valores de orientação para os factores relativos a falhas no revestimento de esquemas de pintura usuais. Estes valores são inicialmente de 1% a 2% para áreas imersas, e de 25% a 50% para áreas enterradas, com uma taxa de deapuração de 1% a 3% ao ano.

6.1.3 Selecção do sistema de protecção catódica

A escolha do tipo de protecção catódica deve ponderar bem os requisitos especificados. A Tabela 11 fornece diversas vantagens e desvantagens relativas aos dois tipos de protecção catódica, que podem ajudar nesta selecção.

Tabela 11 Vantagens e desvantagens dos sistemas de protecção catódica com ânodos com corrente imposta e ânodos de sacrifício

Sistemas de protecção catódica		
	Ânodos com corrente imposta	Ânodos de sacrifício
Vantagens	<p>Variação alta de produção de energia e corrente.</p> <p>Níveis de protecção controláveis.</p> <p>Áreas amplas de protecção.</p> <p>Necessidade de um número reduzido de ânodos, mesmo em ambientes com alta resistência.</p>	<p>Não necessitam de fontes de energia externas.</p> <p>Fácil instalação.</p> <p>Robustez.</p> <p>Improvável interferência de estruturas alheias.</p> <p>Baixa manutenção.</p> <p>Auto regulação.</p> <p>Distribuição de potencial relativamente uniforme, sem risco de sobreprotecção.</p>
Desvantagens	<p>Risco maior de causar interferência em estruturas alheias.</p> <p>Mais requisitos de manutenção.</p> <p>Exigências de uma fonte de energia externa.</p> <p>Maior risco de ligações de polarização incorrectas e de danos devido à sobreprotecção.</p> <p>Mais complexos, menos robustos e a perda de ânodos é mais crítica.</p>	<p>Produção de energia e corrente limitada.</p> <p>Aplicação inviável em ambientes com alta resistência.</p> <p>Necessidade de substituição dos ânodos em sistemas com alto consumo de corrente.</p>

6.2 Sistemas de revestimento

6.2.1 Generalidades

Os sistemas mais utilizados na protecção contra a corrosão de estruturas em aço são os sistemas de revestimento, que também podem proporcionar um acabamento decorativo à superfície da estrutura. Um sistema de revestimento pode ser composto por várias camadas, desde que a compatibilidade seja assegurada. O processo de revestimento envolve a aplicação de pintura, revestimento metálico ou uma combinação dos dois — o sistema “duplex” — na superfície do aço, com o objectivo de garantir o bom desempenho da estrutura durante o tempo de vida projectado, sem necessidade de reparações estruturais.

De acordo com Bayliss *et al.* ^[48], para garantir um desempenho otimizado dos sistemas de revestimento, as seguintes etapas devem ser seguidas:

- 1) Consideração ponderada dos requisitos do revestimento;
- 2) Selecção do sistema de protecção mais adequado;
- 3) Avaliação do projecto da estrutura para otimizar a aplicação e o desempenho do revestimento;
- 4) Adequação do revestimento ao projecto da estrutura ou o inverso;
- 5) Preparação de uma especificação clara e inequívoca;
- 6) Realização do concurso da obra e aprovação dos requisitos pelo empreiteiro escolhido;
- 7) Inspecção da qualidade dos materiais especificados e fornecidos;
- 8) Inspecção de todas as fases do processo de revestimento.

Os factores mais significantes na selecção de um sistema de revestimento são o tipo de estrutura e sua importância, a caracterização ambiental, a durabilidade requerida, o desempenho e o custo do sistema de revestimento.

A especificação deve ser efectiva, clara e inequívoca e elaborada por alguém com os conhecimentos técnicos exigidos e bom conhecimento da tecnologia envolvida na aplicação de sistemas de protecção.

A preservação de estruturas em aço é normalmente fornecida pela manutenção dos revestimentos e, neste caso, podem ser necessários requisitos adicionais, assim como um levantamento do estado da pintura e de testes para determinar a viabilidade de procedimentos de manutenção. A eficácia e o custo da pintura de manutenção dependem do sistema de protecção inicial e da qualidade dos tratamentos de manutenção anteriores. Muitas vezes, é mais económico remover completamente o sistema de protecção e voltar a pintar toda a estrutura do que realizar pintura de manutenção nas várias partes danificadas.

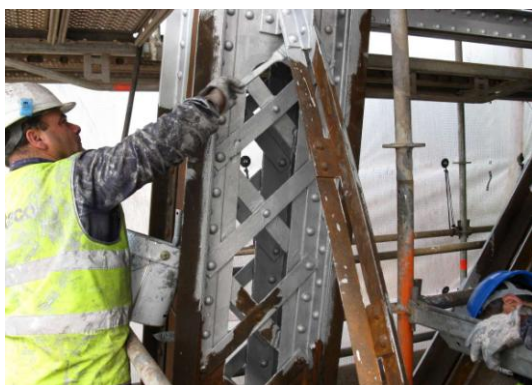
A manutenção dos sistemas de revestimentos é indispensável na estratégia global de protecção das estruturas metálicas e, embora represente a maior parte do aço estrutural pintado, o desenvolvimento de processos básicos e tecnologia é muito menor do que relativamente à pintura de novas estruturas. Na maioria das situações,

apenas é considerado o custo inicial e a manutenção é negligenciada, resultando num aumento do custo total da estrutura.

É também aconselhável a elaboração de um registo adequado e detalhado de todos os procedimentos de revestimento, porque pode fornecer informação importante sobre eventuais falhas prematuras ou outros problemas relativos à aplicação ou desempenho do revestimento. Todos os registos devem conter as datas de operação relacionadas com itens estruturais específicos, com códigos de identificação claros. Outros tipos de informações, tais como o progresso da obra, precauções de segurança e comentários gerais também podem ser úteis. Este tipo de informação também pode ser uma ferramenta útil na selecção futura de sistemas de protecção adequados.

6.2.2 Revestimentos orgânicos

Os revestimentos orgânicos, ou por pintura (Figura 60), são os sistemas de protecção mais utilizados contra a corrosão de estruturas metálicas. Este tipo de revestimento oferece diversas vantagens, tais como fácil aplicabilidade, dimensão ilimitada das estruturas a proteger e acabamento decorativo.



(a)



(b)

Figura 60 Aplicação de um revestimento por pintura: (a) por pincel; (b) por projecção ^(cedidas por REFER)

Dentro do contexto dos revestimentos de tinta, convém definir bem os seguintes dois termos, a tinta e o revestimento de tinta. A tinta é definida como o material líquido e o revestimento de tinta é a película protectora que se forma após a secagem. As tintas são normalmente constituídas por ligantes, pigmentos e solventes, enquanto a película de protecção é formada através da evaporação do solvente e da conversão do ligante numa película de tinta sólida. A tinta também pode ter outros constituintes, e.g. diluentes e aditivos, dependendo das propriedades exigidas. De modo a preservar estas propriedades, devem ser escolhidas técnicas de aplicação apropriadas.

Todos os revestimentos orgânicos devem proporcionar um bom desempenho após a preparação da superfície com o critério de limpeza especificado. Em algumas casos, a preparação da superfície é muito dispendiosa e/ou difícil de executar. Tal situação levou ao desenvolvimento de um novo tipo de revestimento, tolerante à superfície.

Este tipo de revestimento consiste em dois processos. O primeiro é introduzir solventes hidrofílicos ou agentes activos na superfície que, quando combinados com a humidade da superfície, causam a sua dispersão por toda a película protectora. O segundo utiliza tintas epóxi de dois componentes, frequentemente utilizadas com pigmentos de alumínio, de maneira a proporcionar uma boa penetração e “molhagem” da superfície. Os revestimentos tolerantes à superfície só devem ser utilizados quando considerados indispensáveis.

A principal função dos revestimentos de tinta é proteger contra o tipo de ambiente ao qual a estrutura será exposta, mas também devem oferecer:

- ✓ Possibilidade de voltar a pintar;
- ✓ Aplicação fácil;
- ✓ Durabilidade no armazenamento e custo razoável;
- ✓ Durabilidade no ambiente especificado;
- ✓ Formação de uma película protectora coerente e com boa adesão;
- ✓ Resistência ao impacto e a danos mecânicos;
- ✓ Propriedades de secagem rápida.

Com base na durabilidade especificada, deve ser elaborado um plano de manutenção na fase inicial da concepção do sistema de revestimento. Este plano pode ser revisto, se o tipo de utilização da estrutura ou a categoria do ambiente mudar e no caso de surgirem novos materiais e/ou técnicas.

Esquemas de pintura

A protecção das estruturas em aço é geralmente assegurada pela aplicação de várias camadas de tinta, que desempenham um papel específico e formam um esquema de pintura: a primeira camada ou o primário, a(s) camada(s) intermédia(s) e o camada final ou de acabamento.

O primário é aplicado ao substrato e tem como função “molhar” a superfície e proporcionar uma boa adesão do esquema de pintura ao substrato de aço. A norma EN ISO 12944-5:2007^[49] define dois tipos de primário:

- Primários ricos em zinco – contêm pigmentos de pó de zinco, com uma percentagem de voláteis igual ou superior a 80% em massa. O pigmento pó de zinco deve estar em conformidade com a norma EN ISO 3549:2002^[50] e o seu conteúdo pode ser determinado por um método descrito na ASTM D 2371^[51].
- Outros primários – contêm pigmentos de zinco ou outros anticorrosivos, com uma percentagem de voláteis inferior a 80% em massa. Devido a razões de saúde e segurança, não devem ser utilizados cromato de zinco, chumbo vermelho e plumbato de cálcio.

O anexo A da norma EN ISO 12944-5:2007^[49] pode ser consultado para mais informações sobre a selecção adequada do tipo de primário. O anexo B da mesma norma também fornece informação sobre um outro tipo de primário, o primário aplicado em fábrica. As camadas intermédias de tinta são utilizadas para aumentar a

espessura total do esquema de pintura e, no caso de ser utilizado mais de uma, é aconselhável a utilização de tons diferentes. Quanto à camada final, tem como função proteger contra factores ambientais e proporcionam resistência primária à abrasão e decoração, se necessário.

A norma EN ISO 12944-5:2007 ^[49] divide os esquemas de pintura em dois tipos principais:

- ✓ Revestimentos reversíveis – consistem na formação do revestimento de tinta por evaporação do solvente, sendo possível voltar a dissolver a película no solvente original.
- ✓ Revestimentos não reversíveis – inicialmente também se formam por evaporação do solvente, se o tiverem, e depois por reacção química ou coalescência, em caso de tintas de base aquosa. Este processo é irreversível e este tipo de tintas podem ser divididas por tipo genérico, nomeadamente tintas de secagem atmosférica, base aquosa, cura química e cura por humidade.

Esta mesma norma também refere três produtos principais com baixo conteúdo de compostos orgânicos voláteis (VOC): produtos de base aquosa com alto teor de sólidos, produtos livres de solventes e produtos de base aquosa. Os produtos de base aquosa podem ser utilizados em quase todas as categorias de corrosividade do ambiente atmosférico, sendo os restantes geralmente mais apropriados para condições de imersão.

Os esquemas de pintura podem ser aplicados tanto em estaleiro como em obra. A aplicação em estaleiro oferece mais vantagens, tais como melhor controlo das condições ambientais e facilidade na reparação de danos. No entanto, em trabalhos de manutenção, a aplicação é quase sempre *in situ*. A aplicação em obra é muito influenciada pelas condições atmosféricas diárias, mas também oferece algumas vantagens, tais como o menor risco de danos e de contaminação do revestimento.

6.2.3 Revestimentos metálicos

A protecção de estruturas em aço contra a corrosão também pode ser proporcionada por revestimentos metálicos. Este tipo de revestimento é normalmente composto por metais não ferrosos, que fornecem maior protecção contra a corrosão do que o aço carbono. O metal mais utilizado nos revestimentos metálicos é o zinco, seguido pelo alumínio.

A taxa de corrosão do ferro e do aço não é significativa para humidades relativas abaixo dos 60%, mas acima desta percentagem, especialmente em ambientes com cloretos, pode ser 10 a 40 vezes maior do que a do zinco. Este tipo de metal é dispendioso e não é utilizado como metal estrutural porque não tem as propriedades mecânicas exigidas

Sistemas de revestimento metálico

Os revestimentos de zinco são eficazes na protecção contra a corrosão de metais ferrosos, protegendo o aço pelo efeito de barreira física e por acção galvânica. Este

tipo de revestimento pode ser aplicado em aço carbono e em aço de liga baixa de alta resistência ou não.

Relativamente aos revestimentos de alumínio, só são apropriados para aplicação por projecção térmica. De acordo com alguns ensaios, nomeadamente imersão subaquática de revestimentos de zinco e de alumínio, apresentados em Bayliss *et al.* ^[48], os revestimentos de alumínio oferecem uma vida livre de manutenção mais longa do que os revestimentos de zinco. Após 19 anos, embora com alguma corrosão, os revestimentos de alumínio ainda proporcionavam alguma protecção, ao contrário dos de zinco.

A classificação dos revestimentos metálicos não é efectuada apenas pelo tipo de metal mas também pelo método de aplicação. Os métodos utilizados na aplicação de revestimentos metálicos são:

- ✓ Galvanização por imersão a quente;
- ✓ Metalização por projecção térmica;
- ✓ Electrodeposição;
- ✓ Sherardização.

Os revestimentos galvanizados por imersão a quente são adequados para alguns elementos estruturais, dependendo da dimensão, sendo geralmente utilizado o zinco, pois está normalizado e é menos dispendioso do que o alumínio, que proporciona uma melhor protecção. A norma EN ISO 14713-2 ^[52] apresenta recomendações para a aplicação de revestimentos com este tipo de método e, no seu anexo A, são descritos vários tipos de pormenorização. A norma EN ISO 10684:2005 ^[53] também fornece informação relativamente à galvanização por imersão a quente de elementos de ligação.

Os revestimentos metalizados por projecção térmica são aplicados a elementos estruturais e os metais utilizados são o zinco, o alumínio ou suas ligas. O processo de projecção térmica consiste na formação do revestimento através da fundição de um largo número de partículas de metal fornecidas por um fio metálico, que é fornecido por ar ou gás e projectado por um bocal na superfície de aço. Neste processo, não são formadas camadas de ligas, como na galvanização por imersão a quente. Este método de aplicação de revestimentos metálicos é o único que pode ser aplicado *in situ*.

Os revestimentos metálicos aplicados por projecção térmica devem ser selados, de modo a reduzir a sua porosidade. Pode-se utilizar selantes especialmente formulados ou uma fina camada de pintura adequada. Uma outra forma é a selagem natural, que pode ser obtida através da oxidação do revestimento metálico. Este processo ocorre sob determinadas condições ambientais, assim como a selagem artificial, através de conversão química. De acordo com Bayliss *et al.* ^[48], os tipos de selante mais comuns são soluções de cloreto de vinil/copolímeros de acetato, de um componente, e selantes epóxi de dois componentes ou de uretano.

A electrodeposição, também designada por galvanoplastia, é utilizada para componentes e elementos de dimensão reduzida, tais como elementos de ligação. O zinco é o metal de revestimento mais utilizado por este método, seguido pelo alumínio, mas o cádmio também pode ser utilizado em alguns tipos de ambiente.

Este é um processo electroquímico onde o aço é o cátodo e o metal de revestimento é o ânodo da célula. A electrodeposição requer um elevado grau de limpeza da superfície do aço, que normalmente é fornecida por métodos como a decapagem e neste processo não há formação de liga entre o aço e o revestimento.

Revestimentos produzidos sherardização, ou por difusão, também são normalmente aplicados em componentes ou elementos de dimensão reduzida, tais como elementos de ligação. O processo da sherardização ocorre pela imersão a quente, mas, ao contrário da galvanização por imersão a quente, o revestimento é produzido apenas por processos de difusão, com uma temperatura abaixo do ponto de fusão do metal. A principal vantagem deste tipo de revestimentos é a reduzida alteração provocada nas dimensões do componente, particularmente importante em elementos de dimensão reduzida.

Os revestimentos orgânicos, ou por pintura, também podem ser aplicados aos revestimentos metálicos, desde que seja aplicado um tratamento adequado ao revestimento metálico, que proporcione uma boa adesão do revestimento orgânico. Geralmente, a vida de um sistema “duplex” é maior do que a soma das vidas do revestimento metálico e orgânico. Enquanto o revestimento metálico reduz a corrosão sob o sistema “duplex”, o revestimento orgânico protege o metálico contra a corrosão precoce, devido à exposição ao ambiente. Neste tipo de sistema, é aconselhado proceder à manutenção quando o revestimento metálico começa a deteriorar-se, o que normalmente acontece depois do início da deterioração da pintura. As normas EN ISO 12944-5:2007 ^[49] e EN 13438:2005 ^[54] fornecem mais informação sobre os sistemas “duplex”.

6.2.4 Selecção do sistema de revestimento

A selecção do sistema de revestimento para protecção de aço estrutural deve ser cuidadosamente ponderada. Deve ser feita uma comparação entre as vantagens e desvantagens dos revestimentos metálicos e orgânicos. A Tabela 12 contém uma comparação entre as diversas vantagens e desvantagens dos revestimentos metálicos e orgânicos.

Tabela 12 Comparação entre revestimentos metálicos e orgânicos *(adaptado de [48])*

	Vantagens	Desvantagens
Revestimentos metálicos	Aplicação directa e facilmente controlável.	Difícil execução quando é exigido pintura.
	Durabilidade fácil de prever e raramente ocorrem falhas prematuras.	
	Maior resistência a danos e manuseamento fácil.	Difícil execução de soldadura com qualidade após aplicação do revestimento metálico ou quando ocorrem danos sérios no revestimento.
	Em caso de danos, a corrosão ataca preferencialmente o revestimento metálico em vez do aço estrutural.	
	Resistência à abrasão aproximadamente 10 vezes ou mais superior à dos esquemas de pintura.	Limitação na dimensão dos elementos estruturais, na galvanização por imersão a quente.
	Possibilidade de revestimento espesso nas extremidades, ao contrário dos esquemas de pintura.	Sem pintura, os revestimentos metálicos tendem a desenvolver um aspecto desagradável.
Revestimentos orgânicos	A logística necessária à pintura é fácil de adquirir.	Aplicação susceptível de muitos erros devido à mão-de-obra de pouca qualidade, sendo necessário adoptar procedimentos de controlo de qualidade adequados.
	Boa resistência a condições de acidez e pode preencher muitos requisitos, devido à disponibilidade de diversos tipos de tinta, ao contrário dos revestimentos metálicos.	
	Sem limitações relativamente à dimensão e tipo de estrutura.	Difícil previsão do tempo de vida, mesmo com normas e especificações, ao contrário dos revestimentos metálicos.
	Na maioria das vezes, a aplicação é simples.	

A durabilidade de um revestimento está directamente relacionada com as condições de exposição e a sua selecção deve considerar o ambiente, tanto o macro como o microclima, ao qual a estrutura estará exposta. O grau de corrosividade de alguns tipos de ambiente pode causar a ruptura do revestimento e permitir a corrosão do aço. A corrosividade do ambiente está relacionada com a taxa de corrosão que irá influenciar a degradação do revestimento. Devem ser aplicados revestimentos de alta resistência em ambientes agressivos, e menos resistentes, que são normalmente menos dispendiosos, em ambientes moderados. As condições climáticas devem ser bem avaliadas, particularmente a temperatura e a humidade, pois afectam significativamente o desempenho dos revestimentos.

A acessibilidade e os requisitos devem ser muito bem considerados para todos os tipos de revestimentos. Deve ser dada preferência a revestimentos que não exigem procedimentos complexos, tais como decapagem por projecção de abrasivos. O grau de exigência do revestimento depende da importância da estrutura e, em algumas situações, a aparência também pode ser importante. A manutenção geral pode ser afectada pela necessidade de manter um certo tipo de aparência da estrutura.

Outro factor importante na selecção de um sistema de protecção é o custo. O custo deste sistema compreende o custo inicial e o de manutenção, durante o tempo de vida projectado para a estrutura. Durante a utilização da estrutura, o custo da manutenção pode-se alterar devido a novos requisitos, e.g. reforço da estrutura. Neste caso, pode ser necessária uma reavaliação completa da estrutura, de modo a aproveitar qualquer novo desenvolvimento na tecnologia dos sistemas de protecção. Uma avaliação económica é muito difícil de realizar, mas um especialista em revestimentos deve ter a capacidade de levar a cabo uma avaliação razoável do custo total do sistema de protecção ou, pelo menos, uma avaliação rigorosa do custo inicial. Os principais custos a considerar são:

- ✓ Preparação de superfície;
- ✓ Material de revestimento;
- ✓ Aplicação do revestimento;
- ✓ Outras despesas.

No caso dos esquemas de pintura, o custo da preparação de superfície e do material de revestimento é facilmente calculado. As outras despesas referem-se a custos de ferramentas, equipamentos, supervisão, administração, escoramento, atrasos e interrupções.

O custo da preparação de superfície depende da condição da superfície. A Tabela 13 mostra alguns exemplos da preparação de superfície exigida para atingir determinado grau, de acordo com a condição inicial da superfície. Para superfícies com corrosão e ferrugem, o custo aumenta, pois normalmente é necessário decapagem química.

Tabela 13 Preparação de superfície exigida, de acordo com a condição inicial da superfície do aço (adaptado de [48])

Quantidade de abrasivos utilizado na projecção a seco [kg/m ²]			
Condição inicial	Grau de preparação de superfície		
	Sa3	Sa2½	Sa2
Óxidos soltos ou pouca ferrugem ou corrosão por picada	4,06	3,85	2,03
Óxidos com adesão ou ferrugem geral ou pouca corrosão por picada	5,62	5,33	2,79
Superfície pintada ou muita ferrugem ou corrosão por picada moderada	7,27	6,89	3,64
Pintura espessa ou nódulos de ferrugem ou muita corrosão por picada	10,15	9,64	5,07

O custo do material de revestimento é relativamente fácil de determinar. Os esquemas de pintura são determinados pela espessura da película protectora e área coberta. Os revestimentos metálicos galvanizados por imersão a quente são especificados como peso por unidade de área, sendo os aplicados por projecção térmica por espessura. O custo da aplicação depende do método de aplicação, das perdas de material durante a aplicação deste método e do tipo de material aplicado.

Apenas para informação e para proporcionar uma visão geral do custo dos sistemas de protecção, a Tabela 14 mostra uma comparação de custos entre alguns dos sistemas de protecção mais aplicados no aço estrutural.

Tabela 14 Comparação de custos entre diferentes sistemas de protecção de aço estrutural
(adaptado de [48])

Preparação de superfície ^a	Sistema de protecção ^b	Espessura [μm]	Aplicação em estaleiro ou <i>in situ</i>	Custo comparativo
LM	Fosfato de zinco/alquídica	35	<i>in situ</i>	χ
	PE Fosfato de zinco/alquídica	75		
	PE alquídica	60		
PA Sa2½	Primário projectado	20	Estaleiro	1,25 χ
	PE Fosfato de zinco/alquídica	60	Estaleiro	
	PE alquídica	60	<i>in situ</i>	
PA Sa2½	Epóxi rico em zinco de dois componentes	25	Estaleiro	1,58 χ
	PE Fosfato de zinco/alquídica	75	Estaleiro	
	OFM/ alquídica	50	<i>in situ</i>	
	OFM/ alquídica	50	<i>in situ</i>	
Decapagem	Galvanização por imersão a quente	85	Estaleiro	1,16 χ
Decapagem	Galvanização por imersão a quente	85	Estaleiro	1,7 χ
	Limpeza T		<i>in situ</i>	
	PE borracha clorinada	75	<i>in situ</i>	
PA Sa2½	Epóxi rico em zinco de dois componentes	25	Estaleiro	1,7 χ
	OFM/epóxi de dois componentes	85	Estaleiro	
	OFM/epóxi de dois componentes	85	Estaleiro	
	PE borracha clorinada	75	<i>in situ</i>	
PA Sa2½	Galvanização por imersão a quente	140	Estaleiro	1,6 χ
PA Sa2½	Alumínio ou zinco por projecção, dois revestimentos de selante	150	Estaleiro	2,2 χ

^a LM = limpeza manual; PA= decapagem por projecção de abrasivos.

^b PE = produção elevada; OFM = pigmento de óxido de ferro micácio.

Seleccção do esquema de pintura

A norma EN ISO 12944-5:2007 ^[49] fornece orientações na selecção do esquema de pintura mais adequado. O primeiro requisito a especificar é a categoria de corrosividade do ambiente, que deve ser determinado de acordo com a norma NP EN ISO 12944-2:1999 ^[55]. Em caso de ser determinada uma categoria de corrosividade alta, o microclima também deve ser estabelecido.

Outro factor importante na selecção de um esquema de pintura é a durabilidade. A durabilidade de um esquema de pintura é definida pela norma EN ISO 12944-1 ^[56] como o nível de falha do revestimento antes da primeira grande pintura de manutenção. De acordo com a norma EN ISO 12944-5:2007 ^[49], a durabilidade é influenciada pelos seguintes parâmetros:

- ✓ Tipo de esquema de pintura;
- ✓ Design da estrutura;
- ✓ Condição do substrato anterior à preparação de superfície;
- ✓ Grau de preparação da superfície;
- ✓ Condição das juntas e extremidades;
- ✓ Qualidade do trabalho executado;
- ✓ Condições de aplicação.

A Tabela 15 define três categorias de durabilidade, com respectivos intervalos de tempo.

Tabela 15 Categorias de durabilidade (adaptado de [49])

Categoria	Intervalo de tempo
Baixa (B)	2 a 5 anos
Média (M)	5 a 15 anos
Alta (A)	Mais de 15 anos

A selecção de um esquema de pintura também deve ter em atenção tensões especiais de corrosão às quais a estrutura possa estar sujeita, assim como as situações especiais relativamente à sua localização. Isto é importante, porque a disposição e localização da estrutura pode levar a tensões de corrosão que não são consideradas na classificação do ambiente. O anexo B da norma NP EN ISO 12944-2:1999 ^[55] fornece informação relativamente a estas condições.

As tabelas do anexo A da norma EN ISO 12944-5:2007 ^[49] fornecem uma visão geral sobre diversas propostas de tipos genéricos de tinta. Os esquemas de pintura com a durabilidade exigida devem ser identificados nestas tabelas e, tendo em conta a preparação de superfície, deve ser escolhido o mais apropriado. Também deve-se consultar e pedir informações aos fornecedores sobre os diferentes esquemas de pintura disponíveis.

As propriedades da tinta e do revestimento de tinta devem proporcionar:

- ✓ Aplicação e secagem sob as condições especificadas;
- ✓ Boa adesão e decoração exigida;
- ✓ Revestimento protector com propriedades adequadas.

As propriedades dos revestimentos por pintura são principalmente determinadas pelo tipo de ligante. A Tabela 16 fornece informações gerais sobre as principais características físicas e mecânicas de diferentes tipos genéricos de tintas. No entanto, esta tabela não substitui a consulta de um especialista em esquemas de pintura.

Tabela 16 Propriedades gerais de diferentes tipos genéricos de tintas (adaptado de [49])

Adequação	Poli (cloreto de vinil)	Borracha clorada	Acrílica	Alquídicas	Poliuretano, aromático	Poliuretano, alifático	Silicato de zinco etil	Epóxi	Combinação epóxi
B Boa	(PVC)	(CR)	(AY)	(AK)	(PUR, aromático)	(PUR, alifático)	(ESI)	(EP)	(EPC)
L Limitada									
P Pobre									
Nr Não relevante									
Retenção de lustro	L	L	L	L	P	B	Nr	P	P
Retenção de cor	L	L	B	L	P	B	Nr	P	P
Resistência aos químicos:									
Imersão aquática	L	B	L	P	L	P	L	B	B
Chuva / Condensação	B	B	B	L	B	L	B	B	B
Solventes	P	P	P	L	B	L	B	B	L
Solventes (salpicos)	P	P	P	B	B	B	B	B	B
Ácidos	L	B	L	L	B	L	P	L	B
Ácidos (salpicos)	B	B	L	L	B	B	P	B	B
Álcalis	L	L	L	L	L	L	P	B	B
Álcalis (salpicos)	B	B	L	L	B	B	P	B	B
Resistência ao calor seco:									
Até 70°C	P	P	L	B	B	B	B	B	B
70°C a 120°C	Nr	Nr	L	B	B	B	B	B	L
120°C a 150°C	Nr	Nr	L	P	L	P	B	L	L
150°C a 400°C	Nr	Nr	Nr	Nr	Nr	Nr	B	Nr	Nr
Propriedades físicas:									
Resistência à abrasão	P	P	P	L	B	L	B	B	L
Resistência ao impacto	L	L	L	L	B	L	L	B	L
Flexibilidade	B	B	B	L	L	B	P	L	L
Dureza	L	L	L	B	B	L	B	B	B

A escolha do esquema de pintura deve ser baseada na experiência e/ou resultados fornecidos por ensaios de desempenho realizados em laboratório. A compatibilidade

do esquema de pintura com revestimentos existentes, em superfícies previamente revestidas, também deve ser verificada por ensaios. A Tabela 17 fornece informações sobre a compatibilidade dos tipos genéricos de tinta mais comuns.

Tabela 17 Compatibilidade de diferentes tipos genéricos de tintas ^(adaptado de [48])

		1º Revestimento de tinta						
		Betume	Vinil	Borracha clorada	Alquídica	Epóxi	Combinação Epóxi	Poliuretano
2º Revestimento de tinta	Betume	Pb	Nr	Nr	Nr	Nr	Nr	Nr
	Vinil	Nr	Pb	Nr	Nr	Pb	Pb e/ou As	Pb
	Borracha clorada	Nr	Pb	Pb	Rf	Pb	Pb e/ou As	Pb
	Alquídico	Nr	Nr	Nr	Pb	Pb	Pb e/ou As	Pb
	Epóxi	Nr	Nr	Nr	Nr	Pb	Pb e/ou As	Nr
	Combinação Epóxi	Nr	Nr	Nr	Nr	Pb	Pb	Nr
	Poliuretano	Nr	Nr	Nr	Nr	Pb	Pb e/ou As	Pb
Pb – Provavelmente boa Nr – Não recomendada Rf – Resulta em fissuras As – Adesão satisfatória, mas a aparência é afectada por <i>bleeding</i>								

Seleccção do revestimento metálico

De acordo com Bayliss *et al.* ^[48], a selecção do metal de revestimento deve incluir parâmetros tais como:

- ✓ Resistência à corrosão;
- ✓ Custo;
- ✓ Aplicação.

Normalmente, o metal escolhido é o zinco, seguido pelo alumínio. Ao comparar estes dois metais, considera-se que o alumínio proporciona uma maior protecção contra a corrosão do que o zinco em ambientes agressivos, excepto em ambientes alcalinos. O grau de preparação de superfície exigido para uma boa adesão dos revestimentos de alumínio também é maior.

Embora esteja comprovada a eficácia dos revestimentos de alumínio aplicados por projecção térmica, normalmente é utilizado o zinco, porque sobre este existe muito mais informação disponível.

A norma EN ISO 14713-1:2009 ^[57] aborda o desempenho de revestimentos de zinco em ambiente atmosférico e contém informação sobre a taxa de corrosão do zinco,

incluindo a redução de poluentes recentemente legislada. Esta norma também fornece a espessura adequada, de acordo com o tipo de corrosividade ambiental ao qual a estrutura estará exposta. Esta informação é importante, porque a vida de um revestimento de zinco depende directamente da sua espessura. De acordo com esta norma, a selecção de um sistema de revestimento de zinco deve tomar em consideração os seguintes factores:

- ✓ Ambiente, tanto macro como microclimático, incluindo futuras alterações identificadas e alguma condição de exposição excepcional;
- ✓ Tempo de vida exigido até a primeira manutenção;
- ✓ Necessidade de pós-tratamentos, protecção temporária e pintura;
- ✓ Disponibilidade e custo;
- ✓ Dificuldade de manutenção.

Na prática, a escolha do tipo de revestimento metálico, para elementos estruturais, reside entre revestimentos de zinco galvanizados por imersão a quente ou revestimentos aplicados por projecção térmica. A melhor opção é a galvanização por imersão a quente, porque o controlo de produção é mais fácil e não é necessária decapagem por projecção de abrasivos para atingir espessuras razoáveis. Embora seja mais fácil o controlo dos trabalhos em estaleiro, existe sempre o risco de danos durante o transporte, pelo que, em caso de sistemas “duplex”, a camada final deve ser aplicada *in situ*. No caso de a especificação exigir aplicação do revestimento metálico em obra, a única opção viável é a projecção térmica.

Para elementos de dimensão reduzida, tais como parafusos e roscas, a escolha entre galvanização por imersão a quente e sherardização não é muito clara. A sherardização é mais dispendiosa, mas proporciona uma superfície mais adequada para pintura posterior e um melhor controlo das tolerâncias da dimensão. Esta situação é muito útil para componentes com rosca, pois a galvanização por imersão a quente pode causar problemas de perda de material.

A galvanização por imersão a quente também modifica a reactividade do aço através da composição química, conforme descrito na norma EN ISO 14713-2 ^[52]. Este facto faz com que alguns tipos de ferro fundido não sejam apropriados para galvanização por imersão a quente, devido à sua composição química e metalúrgica. No caso de revestimentos metálicos aplicados por projecção térmica ou sherardização, a composição química do aço é irrelevante.

6.3 Preparação de superfície

6.3.1 Generalidades

A preparação de superfícies de uma estrutura já existente normalmente implica requisitos diferentes daqueles de uma estrutura nova.

As superfícies onde vão ser aplicados sistemas de revestimento devem estar limpas e aptas a receber estes sistemas. O objectivo da preparação de superfície é a remoção de produtos de corrosão e de material prejudicial à adesão do primário ao substrato

de aço. Um dos principais factores no desempenho a longo termo de um revestimento é a adesão. Uma adesão pobre pode causar o descamação do revestimento, o destacamento da superfície e/ou reduzir a resistência à humidade e a produtos de corrosão. O tipo de adesão mais efectiva é oferecido pela galvanização por imersão a quente, onde é formada uma liga de aço/zinco. Esta liga é proporcionada por um banho de zinco quente à superfície do aço, formando uma ligação química. Relativamente a revestimentos orgânicos, a adesão ocorre principalmente por ligação física.

As moléculas de resina comportam-se como ímanes fracos, com os seus pólos positivos e negativos a atraírem grupos opostos no substrato. Este tipo de adesão só é efectivo a uma distância molecular do aço e exige uma superfície limpa. Os revestimentos orgânicos que não conseguem aderir à superfície do aço por este processo são apenas utilizados para protecção temporária.

A adesão mecânica consiste no desbaste da superfície, por métodos tais como a decapagem por projecção de abrasivos, e exige uma superfície livre de óxidos, ferrugem, tinta velha e qualquer outro tipo de impureza. Alguns tipos de revestimento podem exigir um perfil de superfície elevado, pois pode ocorrer uma retracção excessiva durante a cura.

De acordo com a norma NP EN ISO 8504-1:2003 ^[58], o desempenho dos revestimentos de protecção contra a corrosão depende principalmente da condição do substrato do aço imediatamente antes da aplicação do revestimento, sendo os seguintes os principais factores de influência:

- ✓ Presença de ferrugem e óxidos;
- ✓ Presença de contaminantes, incluindo sais, poeiras, óleos e gorduras;
- ✓ Perfil da superfície.

Relativamente à manutenção de estruturas com sistemas de revestimentos, a mesma norma recomenda uma consideração ponderada dos seguintes parâmetros:

- ✓ Idade e localização da estrutura;
- ✓ Qualidade da superfície anterior;
- ✓ Desempenho e extensão da degradação do sistema de revestimento existente;
- ✓ Tipo e agressividade da corrosividade do ambiente anterior e posterior;
- ✓ Sistema de revestimento proposto.

De acordo com a norma NP EN ISO 8504-1:2003 ^[58], a preparação de substratos de aço deve ser realizado de acordo com as seguintes normas:

- EN ISO 8501 ^{[61]-[64]}: Avaliação visual da limpeza da superfície;
- EN ISO 8502 ^{[65]-[73]}: Testes para avaliação da limpeza das superfícies;
- EN ISO 8503 ^{[74]-[78]}: Características de rugosidade da superfície de superfícies de aço decapadas por projecção de abrasivos;
- NP EN ISO 8504 ^{[58]-[60]}: Métodos de preparação de superfície.

6.3.2 Métodos de preparação da superfície

A norma NP EN ISO 12944-4:1999 ^[79] descreve diversos métodos de preparação da superfície, dividindo-os em três tipos:

- ✓ Limpeza com água, solventes e químicos;
- ✓ Limpeza mecânica, incluindo decapagem por projecção;
- ✓ Limpeza com chama.

Em seguida, os métodos enumerados serão descritos, assim como alguns métodos inovadores na preparação de superfície, apresentados por Bayliss *et al.* ^[48].

Limpeza com água, solventes e químicos

- Limpeza com água – Um jacto de água limpa e fresca é direccionado à superfície a limpar, com uma pressão especificada, de acordo com os contaminantes a remover. A remoção de óleos, gorduras, etc., exige a adição de detergentes adequados e, neste caso, uma limpeza final com água limpa e fresca é necessário.
- Limpeza com vapor – É utilizada para remover óleos e gorduras. No caso de serem utilizados detergentes, uma lavagem final com água limpa e fresca é necessária.
- Limpeza por emulsão – É utilizada para remover óleos e gorduras e é necessária uma limpeza final com água limpa e fresca.
- Limpeza alcalina – É utilizada para remover óleos e gorduras, sendo necessária uma limpeza final com água limpa e fresca.
- Limpeza por solventes orgânicos – É utilizada para remover óleos e gorduras, utilizando solventes orgânicos adequados.
- Limpeza por meios de conversão química – É utilizada em superfícies galvanizadas por imersão a quente e em revestimentos de zinco aplicados por electrodeposição e sherardização. Após este tipo de limpeza, é aconselhada uma limpeza final com água limpa e fresca. Este tipo de tratamento só deve ser utilizado após aprovação do fornecedor do sistema de protecção.
- *Stripping* – É utilizado para remover revestimentos orgânicos através de pastas alcalinas ou à base de solventes. Normalmente, este tipo de limpeza não é permitido em áreas reduzidas e é necessária uma limpeza final com água limpa e fresca.
- Decapagem com ácido – O componente é submerso num banho ácido adequado à remoção de óxidos e ferrugem. Este tipo de limpeza é normalmente realizado em estaleiro e com monitorização.

Limpeza mecânica, incluindo decapagem por projecção

- Limpeza com ferramentas manuais – inclui escovas, espátulas, raspadores, esponjas de fabrico sintético com abrasivos incorporados, papel de esmerilar e martelos de remoção de ferrugem. A norma NP EN ISO 8504-3 ^[60] descreve vários métodos manuais e mecânicos para a preparação de superfície. Este método não consegue

atingir um nível de limpeza tão alto como a decapagem por projecção e normalmente também não é capaz de remover óleos, gorduras e substâncias como cloretos e sulfatos.

- Limpeza com ferramentas mecânicas – inclui escovas rotativas, vários tipos de esmerilamento mecânico (Figura 61), martelos de percussão e de agulhas. Devem-se evitar entalhes, assim como qualquer tipo de dano ou deformação no elemento estrutural. Este tipo de limpeza é mais efectivo do que o método manual, atingindo um grau superior de limpeza e cobrindo uma área maior. No entanto, não é tão eficaz como a decapagem por projecção. Geralmente, as ferramentas mecânicas são melhores que as manuais para promover a adesão do primário. As ferramentas mecânicas são apropriadas para graus de preparação da superfície altos, particularmente quando a decapagem por projecção não é exequível ou permitida.



Figura 61 Preparação de superfície por esmerilamento mecânico (cedida por REFER)

- Decapagem por projecção – A decapagem por projecção de abrasivos é o método mais utilizado e eficaz no tratamento mecânico da superfície. Este método permite uma taxa de produção alta e pode ser aplicado a quase todos os tipos e formas de superfície em aço. O equipamento utilizado pode ser fixo ou móvel e adaptado de acordo com a superfície a limpar. A limpeza abrasiva permite atingir diferentes perfis e graus de preparação de superfície. De acordo com a norma NP EN ISO 8504-1:2003^[58], podem-se produzir os seguintes efeitos na superfície do aço: limpeza, martelagem, desbaste, nivelamento e *lapping*. Também é possível proceder à remoção parcial de revestimentos, deixando intactos os revestimento sem boas condições. Este método deve ser aplicado de acordo com as normas NP EN ISO 8504-2:2003^[59] e as várias partes da NP EN ISO 11124^{[85]-[87]} e da NP EN ISO 11126^{[88]-[99]}. Os substratos de aço limpos por decapagem por projecção são especificados de acordo com os comparadores de perfil da superfície descritos na norma 8503-1:1995^[74] e classificados de acordo com a norma 8503-2:1995^[75]. A adesão do revestimento é influenciada pelo perfil de superfície do substrato e, para sistemas de protecção, o perfil de superfície mais adequado é o médio (G) ou médio (S). De acordo com a norma NP EN ISO 8504-2:2003^[59], os tipos de decapagem por projecção disponíveis são:

- Decapagem por projecção a seco de abrasivos:
 - ✓ Decapagem por projecção centrífuga de abrasivos – O abrasivo é uniformemente projectado na superfície a limpar, através de impulsores ou rodas a alta velocidade. Este processo é uma operação contínua e pode ser aplicado em peças com qualquer grau de ferrugem, desde que a superfície tenha uma boa acessibilidade. Como desvantagem, este método não é capaz de limpar todos os contaminantes da superfície e o equipamento necessário requer uma preparação cuidadosa em cada aplicação, resultando em limitações relativamente à repetição de trabalhos.
 - ✓ Decapagem por projecção de abrasivos com ar comprimido – Uma mistura de ar/abrasivo é projectada por ar comprimido a alta velocidade, através de um bocal, na superfície a limpar. Este método pode ser utilizado, numa operação contínua ou não, para limpar qualquer tipo de peça com qualquer grau de ferrugem. Como limitações, tem-se possíveis restrições ambientais devido à formação de pó e, tal como no método anterior, a remoção de contaminantes químicos requer limpeza adicional.
 - ✓ Decapagem por projecção de abrasivos com aspiração – É similar ao último método, mas o bocal está ligado a uma cabeça de sucção, selada à superfície, que recolhe os contaminantes e o abrasivo excedente. Este método produz pouco pó e é apropriado para limpeza localizada e para graus de preparação de superfície até Sa2½. Este tipo de decapagem necessita limpeza adicional para contaminantes químicos e não deve ser aplicado a formas irregulares, nem ao grau de ferrugem D.
- Decapagem por projecção húmida de abrasivos – A água utilizada deve ter um conteúdo baixo de sal e podem-se utilizar inibidores de ferrugem, desde que sejam aplicados sistemas de protecção adequados. Os subtipos deste método são:
 - ✓ Decapagem por projecção de abrasivos com injeção húmida – É similar à decapagem por projecção de abrasivos com ar comprimido, mas com a adição de uma reduzida quantidade de líquido antes do bocal, resultando num procedimento livre de poeiras. Normalmente, o líquido utilizado é água limpa e fresca, com um consumo de 15 a 25 l/h. Este método é utilizado para limpar qualquer tipo de peça com qualquer grau de ferrugem e o líquido é adicionado de acordo com a produção de pó. Após a preparação da superfície, pode-se verificar a ocorrência súbita de ferrugem (*flash rusting*), pois a superfície estava inicialmente húmida.
 - ✓ Decapagem por projecção húmida de abrasivos com ar comprimido – É similar à decapagem por projecção de abrasivos com ar comprimido, mas com a adição de líquido, normalmente água limpa e fresca, produzindo um fluxo de ar/abrasivo/água. Este método pode ser utilizado, numa operação contínua ou não, para limpar qualquer tipo de peça com qualquer grau de ferrugem, particularmente para a corrosão localizada, aço contaminado com químicos e quando são exigidos níveis baixos de resíduos de sais solúveis. Durante a manutenção, este método permite a remoção selectiva e parcial de revestimentos, através do ajuste da pressão e das proporções da mistura.

As limitações deste método incluem a produção de uma substância sobre a superfície limpa e também o aparecimento súbito de ferrugem.

- ✓ Decapagem por projecção de lamas abrasivas (*slurry blast-cleaning*) – Abrasivo fino é distribuído num líquido, normalmente água, sendo projectado por bombas ou ar comprimido na superfície a limpar. Este método é adequado a peças de dimensões reduzidas, onde normalmente apenas é exigido um perfil de superfície fino, e é particularmente adequado para reduzir a quantidade de sais solúveis na superfície.
 - ✓ Decapagem por projecção de líquido pressurizado – Uma mistura abrasiva é introduzida, como pasta seca ou húmida, num fluxo que é um líquido pressurizado, normalmente água, projectado por um bocal na superfície a limpar. A aplicabilidade deste método é a mesma da decapagem por projecção húmida de abrasivos com ar comprimido e pode-se atingir um grau de preparação de superfície Sa3 para graus de ferrugem A, B e C, e Sa2½ para o grau de ferrugem D. Este tipo de decapagem também é particularmente adequado para reduzir a quantidade de sais solúveis na superfície, mas é preciso tomar cuidado com a projecção de água com grande pressão. As limitações são as mesmas que para a decapagem por projecção húmida de abrasivos com ar comprimido.
- Aplicações particulares da decapagem por projecção:
- ✓ Decapagem por projecção dispersa de ar – É utilizada para limpar ou proporcionar rugosidade a superfícies com revestimentos orgânicos e metálicos ou para remover a camada superior de revestimentos orgânicos sem danificar os revestimentos inferiores em bom estado. Geralmente, é utilizado um grão fino e pouca pressão de ar. Estes parâmetros e outros, tais como a dureza do abrasivo, o ângulo de ataque e a distância do bocal ao substrato, devem ser otimizados através de testes.
 - ✓ Decapagem por projecção localizada de ar – É uma forma comum de decapagem por projecção de ar comprimido ou com injeção húmida que apenas limpa nódoas individuais, tais como ferrugem ou manchas de soldadura. Em superfícies que não podem ser novamente revestidas sem limpeza prévia, também pode ser combinada com o tipo de decapagem anterior.
 - ✓ Decapagem por projecção de água ou hidrodecapagem – Um jacto de água limpa e fresca é projectado na superfície a limpar. Os contaminantes a remover determinam a pressão da água e, no caso de serem utilizados detergentes, é necessária uma lavagem final com água limpa e fresca. As variações de pressão de água normalmente utilizadas são pressão alta, que varia entre 70 e 170 MPa, e pressão ultra alta (Figura 62), com pressões acima de 170 MPa.



Figura 62 Hidrodecapagem (cedida por REFER)

Limpeza com chama

Este tipo de limpeza consiste em passar uma chama de acetileno/oxigénio sobre a superfície a limpar, de modo a remover todos os óxidos e ferrugem através do efeito da chama e da acção do calor. Após este procedimento, deve-se utilizar escovas mecânicas para remover os restos de poeiras e de contaminantes.

Métodos de desenvolvimento mais recente

- Decapagem por projecção criogénica – Consiste em projectar granalhas (*pellets*) de dióxido de carbono ou cristais de gelo, que supostamente removem pinturas velhas sem danificar o substrato. Este método é seguro e o único resíduo produzido, além da tinta removida, é água. Uma outra vantagem da projecção de dióxido de carbono é a possibilidade de limpeza do equipamento eléctrico durante a preparação da superfície, devido à sua não condutividade. O equipamento de protecção exigido consiste apenas em protectores de ouvido, pois, supostamente, este método gera ar com pouco conteúdo de dióxido de carbono. No entanto, se for um espaço confinado, é necessário fato protector e respirador. As únicas desvantagens deste método em relação aos outros são a menor velocidade de limpeza e o pouco desenvolvimento na área de limpeza do aço estrutural. A aplicação deste tipo de decapagem é mais adequada para metais macios ou materiais compostos.
- Limpeza a laser – Também está sob desenvolvimento e a aplicabilidade considerada é, principalmente, o *stripping* de pinturas velhas através de um dos seguintes dois processos, laser CO₂ ou laser Xénon. O primeiro é considerado mais eficaz, porque precisa de menos potência na remoção de revestimentos. A energia do laser CO₂ incinera o ligante da tinta, deixando um resíduo de cinzas secas que pode ser aspirado posteriormente. O laser Xénon funciona da mesma maneira que uma lâmpada flash com uma câmara, mas com a produção de uma luz muito mais intensa. Este procedimento incinera o revestimento a remover e também deixa um

resíduo de cinzas secas. No entanto, tem a possibilidade de optimização consoante o tipo específico de revestimento a remover. A principal desvantagem da limpeza a laser é a baixa velocidade de limpeza e os custos elevados inerentes à tecnologia laser. No entanto, a eliminação de resíduos é muito mais fácil do que nos outros métodos convencionais de preparação de superfície.

- Decapagem por projecção de uma esponja – Este processo foi concebido tendo em conta a saúde e as restrições ambientais e consiste no impacto, por ar comprimido, de uma esponja sintética de polímeros, impregnada com abrasivo, na superfície metálica. A deformação da esponja absorve o impacto, retirando a pintura, ferrugem ou óxidos da superfície. A esponja também retira os detritos e as poeiras, ao contrário dos abrasivos convencionais mais resistentes, que ressaltam na superfície. Após o procedimento, esta esponja pode ser recolhida, limpa e reutilizada e, quando já não estiver em condições de utilização, pode ser reciclada. O tipo de abrasivo contido na esponja depende da superfície a limpar e do perfil de superfície exigido. Esponjas sem abrasivo também podem ser utilizadas para limpar óleos, gorduras e outros contaminantes.

A Tabela 18 mostra a adequação dos diferentes métodos de preparação, de acordo com o tipo de matéria a remover.

Tabela 18 Procedimentos para remoção de camadas exteriores e matéria estranha (adaptado de [79])

Matéria a ser removida	Procedimento	Notas ¹⁾
Gordura e óleo	Limpeza com água	Água fresca com adição de detergentes. Pode ser utilizada pressão (< 70 MPa). Lavagem final com água fresca.
	Limpeza com vapor	Água fresca.
	Limpeza por emulsão	Se forem utilizados detergentes, lavagem final com água fresca. Lavagem final com água fresca.
	Limpeza alcalina	Quando são utilizadas soluções alcalinas fortes, o alumínio, zinco ou outros metais de revestimento podem ser susceptíveis à corrosão. Lavagem final com água fresca.
	Limpeza com solventes orgânicos	Muitos solventes orgânicos são prejudiciais à saúde. Se forem utilizados panos, estes devem ser substituídos frequentemente.
Contaminantes solúveis em água, e.g. sal	Limpeza com água	Água fresca com adição de detergentes. Pode ser utilizada pressão (< 70 MPa).
	Limpeza com vapor	Lavagem com água fresca.
	Limpeza alcalina	Quando são utilizadas soluções alcalinas fortes, o alumínio, zinco ou outros metais de revestimento podem ser susceptíveis à corrosão. Lavagem final com água fresca.
Óxidos	Decapagem com ácidos	Este processo normalmente não é realizado em obra. Lavagem final com água fresca.
	Decapagem por projecção seca de abrasivos	Devem ser removidos todas as poeiras e depósitos de resíduos soltos por jacto de ar seco ou por aspiração.
	Decapagem por projecção húmida de abrasivos	Lavagem final com água fresca.
	Limpeza por chama	É necessária limpeza por ferramentas mecânicas para remover resíduos de processos de combustão, seguida da remoção de poeiras e depósitos de resíduos soltos.
Ferrugem	Mesmos procedimentos que para os óxidos, mais:	
	Limpeza com ferramentas mecânicas	A escovagem mecânica pode ser utilizada em zonas com ferrugem solta, enquanto o esmerilamento pode ser utilizado na ferrugem com boa adesão. Poeira e depósitos de resíduos soltos devem ser removidos.
	Hidrodecapagem	Serve para a remoção de ferrugem solta. O perfil da superfície não é afectado.
	Decapagem por projecção localizada de ar	Para remoção localizada de poeiras.

*Tabela 18 Procedimentos para remoção de camadas exteriores e matéria estranha (adaptado de [79])
(continuação)*

Matéria a ser removida	Procedimento	Notas ¹⁾
Esquemas de pintura	Decapagem	Pastas à base de solventes para revestimentos sensíveis a solventes orgânicos. Os resíduos devem ser removidos por lavagem com solventes.
	Decapagem por projecção seca de abrasivos	Devem ser removidos todas as poeiras e depósitos de resíduos soltos por jacto de ar seco ou por aspiração.
	Decapagem por projecção húmida de abrasivos	Lavagem final com água fresca.
	Hidrodecapagem	Para remoção de revestimentos orgânicos com uma adesão pobre. Para revestimentos com uma boa adesão, pode-se utilizar limpeza com pressão ultra alta (> 170 MPa).
	Decapagem por projecção dispersa de ar	Para dar rugosidade a revestimentos ou remoção da camada exterior.
	Decapagem por projecção localizada de ar	Para remoção localizada de revestimentos.
Produtos de corrosão de zinco	Decapagem por projecção dispersa de ar	Quando aplicada em zinco, pode ser adicionado óxido de alumínio, silicatos ou areia olivina.
	Limpeza alcalina	Para corrosão localizada no zinco, pode ser utilizada uma solução de amónia de 5% (m/m) com abrasivos embutidos. Com um pH alto, o zinco é susceptível à corrosão.

¹⁾ Quando é necessário lavar com jacto de água e secagem, as estruturas aparafusadas e rebitadas devem ser tratadas com cuidado especial.

6.3.3 Selecção do método de preparação da superfície

A selecção do método de preparação de superfície depende do tipo de revestimento existente na superfície a preparar e do estado de degradação do mesmo, assim como dos requisitos do sistema de protecção a aplicar.

A selecção do método de preparação de superfície também deve tomar em consideração o grau de preparação de superfície exigido, onde o nível apropriado de limpeza e de rugosidade da superfície são definidos de acordo com o revestimento a aplicar. A escolha do grau de preparação de superfície também deve ser bem ponderada, porque o custo desta operação varia de acordo com o nível de limpeza exigido.

A norma NP EN ISO 8504-1:2003 ^[58] contém os princípios gerais que devem ser utilizados na selecção do método de preparação da superfície mais adequado. De acordo com esta norma, a selecção do método de preparação de superfície depende dos seguintes factores:

- ✓ Condição da superfície;
- ✓ Exequibilidade, e.g. condições de operação;
- ✓ Preparação de superfície completa ou parcial;
- ✓ Grau de preparação exigido ou especificado;
- ✓ Sistema de revestimento a aplicar;
- ✓ Custo;
- ✓ Outros requisitos particulares, e.g. perfil da superfície.

Quando é especificada a decapagem por projecção de abrasivos, é necessário escolher um tipo de abrasivo adequado. O tipo de abrasivo é muito importante para atingir a condição de superfície especificada e devem ser realizados ensaios preliminares para identificar o mais eficaz. A selecção do abrasivo deve considerar a influência da dimensão da partícula no perfil da superfície e a utilização de uma mistura equilibrada de tamanhos, de modo a produzir uma condição de superfície otimizada. A norma NP EN ISO 8504-1:2003 ^[58] fornece os parâmetros a considerar na selecção de um abrasivo, nomeadamente:

- ✓ Subgrupo e tipo de composição química;
- ✓ Variação da dimensão da partícula;
- ✓ Dureza da partícula.

A norma NP EN ISO 12944-4:1999 ^[79] divide os vários tipos de superfície a preparar da seguinte forma:

- i. Superfícies sem revestimento – Aço nu, coberto ou não com óxidos, ferrugem ou outros contaminantes;
- ii. Superfícies com revestimentos metálicos:
 - Galvanizados por imersão a quente:
 - ✓ Superfícies sem alteração por acção atmosférica e biológica – Aplicação de decapagem por projecção dispersa com jacto de ar (*sweep blast-cleaning*) usando abrasivos não metálicos ou outro tratamento, de acordo com a especificação. A superfície preparada deve estar livre de danos mecânicos e contaminantes aderentes e inclusos. A rugosidade da superfície e a espessura mínima do revestimento de zinco deve estar de acordo com a especificação.
 - ✓ Superfícies com alteração por acção atmosférica e biológica – Neste tipo de superfície, normalmente ocorre a formação de produtos de corrosão, assim como a acumulação de contaminantes. A limpeza pode ser realizada com água quente ou pressurizada, a vapor, por decapagem por projecção

dispersa com jacto de ar ou com ferramentas manuais ou mecânicas, dependendo da natureza e da extensão da contaminação.

- Por projecção térmica – Requer a protecção temporária ou parcial das superfícies antes da aplicação de mais revestimentos e deve ser imediatamente pintada após aplicação do revestimento metálico, de modo a evitar condensação. A norma EN ISO 2063:2005 ^[80] fornece mais informação sobre a projecção térmica de revestimentos metálicos.
 - Por electrodeposição – Revestimentos deste tipo com uma adesão fraca devem ser completamente removidos. Para remover contaminantes, como gorduras, óleos ou sais, pode-se utilizar detergentes especiais, água quente, vapor de água ou outros tratamentos.
 - Por sherardização – Aplica-se o mesmo que para o método da electrodeposição.
- iii. Superfície pintada com um primário aplicado em fábrica – É realizada decapagem automática por projecção de abrasivos e a aplicação do primário também é automática.
- iv. Outras superfícies pintadas (superfícies com revestimentos metálicos previamente pintados) – Todos os revestimentos com má adesão e defeitos devem ser completamente removidos. Para remover contaminantes, como gorduras, óleos ou sais, pode-se utilizar detergentes especiais, água quente, vapor de água ou outros tratamentos. Em seguida, pode-se aplicar a decapagem por projecção dispersa com jacto de ar usando grãos inertes ou outro material adequado.

Relativamente à pintura de manutenção, a condição da superfície também pode ser dividida conforme mostra a Tabela 19.

Tabela 19 Condição de superfícies pintadas (adaptado de [48])

Condição da superfície	
1	Camadas finais com mau aspecto devido a desbotamento, pulverulência, possível fissuração reduzida, sem ferrugem visível ou deterioração do substrato.
2	Similar à condição 1, mas com ferrugem visível em áreas vulneráveis, e.g. áreas com retenção de água.
3	Com ferrugem localizada, normalmente causada por uma espessura inadequada da pintura.
4	Com empolamento, fissuração ou descamação até ao substrato, aparentemente aleatória.

A superfície ideal para manutenção é a condição de superfície 1, que apenas necessita de esmerilamento, em caso de superfícies lustrosas, ou de escovagem ou jacto de água com pouca pressão para remoção de depósitos de pó. Na condição 2, qualquer percentagem significativa de ferrugem no aço deve ser removida por decapagem por projecção de abrasivos ou por jacto de água com pressão ultra alta. Nestes casos,

também é necessário assegurar que a pintura existente tem qualidade suficiente para resistir ao tratamento exigido para a adesão da nova pintura à antiga. Na condição de superfície 3, o esquema de pintura não é necessariamente prejudicado pela corrosão, e lavagem ou escovagem com abrasão podem ser suficientes para preparar a superfície. Finalmente, em relação à condição de superfície 4, normalmente é necessário limpar até ao substrato, preferencialmente com jacto de água de pressão ultra alta ou decapagem por projecção húmida de abrasivos.

A manutenção de revestimentos metálicos é normalmente realizada com pintura. Aço galvanizado por imersão a quente pode ser utilizado sem pintura, mas é preferível a sua aplicação antes da ocorrência de ferrugem na superfície. Em caso de presença significativa de ferrugem no aço galvanizado, deve ser utilizada a decapagem por projecção de abrasivos. No entanto, se não tiver ferrugem, a remoção de toda a pintura solta é suficiente. No caso de áreas reduzidas com degradação do revestimento, o tratamento pode ser realizado com ferramentas mecânicas de esmerilamento. Relativamente a aço protegido com revestimento metálico produzido por sherardização, o tratamento deve ser o mesmo do aço galvanizado.

A Tabela 20 fornece informação importante a considerar antes da elaboração de uma especificação para a preparação de superfície.

Tabela 20 Informação a considerar antes da elaboração de uma especificação ^(adaptado de [58])

Tipo de superfície	Informação
Sem revestimento	<p>Tipo de aço e sua espessura</p> <p>Grau de ferrugem, avaliado de acordo com a norma EN ISO 8501-1:2007 ^[61], com detalhes relevantes</p> <p>Detalhes suplementares</p>
Com revestimento	<p>Tipo, espessura aproximada, condição e idade do revestimento ou sistema de revestimento</p> <p>Grau de ferrugem, avaliado de acordo com a norma NP EN ISO 4628-3:2005 ^[81], com detalhes relevantes sobre ferrugem sob revestimento aparente</p> <p>Grau de fissuração, avaliado de acordo com a norma NP EN ISO 4628-4:2005 ^[82]</p> <p>Grau de descamação, avaliado de acordo com a norma NP EN ISO 4628-5:2005 ^[83]</p> <p>Detalhes suplementares</p>

A Tabela 21 mostra os graus de ferrugem definidos pela norma EN ISO 8501-1:2007 ^[61]. A preparação de superfície deve ser realizada o mais breve possível para os graus de ferrugem A e B e, em caso de tratamento manual, também para C. Em seguida, deve ser aplicado um primário adequado.

Tabela 21 Especificação do grau de ferrugem *(adaptado de acordo com [61])*

Grau de ferrugem	Condição da superfície
A	Largamente coberta com óxidos e com pouca ou nenhuma ferrugem
B	A ferrugem começou e os óxidos começaram a descamar
C	Com alguma corrosão visível, mas com ou sem óxidos
D	Com corrosão visível, sem óxidos

De acordo com a norma NP EN ISO 12944-4:1999 ^[79], a preparação de superfícies está dividida em preparação de superfície geral ou primária e em preparação de superfície parcial ou secundária. O primeiro tipo refere-se ao tratamento de toda a superfície até ao substrato, enquanto a preparação parcial deixa partes da estrutura com revestimentos metálicos ou orgânicos ainda em condições. A escolha do método de preparação da superfície é determinada pelo perfil da superfície e nível de limpeza exigido. Estes são os principais requisitos considerados nos diferentes graus de preparação.

Os anexos A e B da norma referida acima definem diversos graus de preparação de superfície, respectivamente para preparação geral e parcial. A preparação geral diz respeito à remoção de óxidos, ferrugem, revestimentos existentes e contaminantes e corresponde à conversão de toda a superfície em aço nu. Os graus de preparação correspondentes são Sa, St, Fl e Be. A preparação parcial de superfícies trata da remoção de ferrugem e contaminantes, mas deixa os revestimentos em bom estado intactos. Os graus de preparação correspondentes a esta categoria são P Sa, P St e P Ma.

A norma EN ISO 8501-1:2007 ^[61] também contém informação sobre os graus de preparação de superfície Sa 1, Sa 2, Sa 2^{1/2}, Sa 3 para decapagem por projecção de abrasivos, St 2, St 3 para limpeza por ferramentas manuais e mecânicas, e Fl para limpeza por chama. No Suplemento Informativo desta norma, também se pode encontrar exemplos fotográficos de alterações na aparência, provocadas pela decapagem por projecção de diferentes abrasivos.

De acordo com a norma EN ISO 8501-1:2007 ^[61], a selecção do grau de preparação da superfície depende dos seguintes factores:

- ✓ Condição da superfície;
- ✓ Sistema de protecção a aplicar;
- ✓ Corrosividade do ambiente ao qual a superfície revestida estará exposta;
- ✓ Preparação parcial ou completa da superfície;
- ✓ Custo.

7. Conclusões e sugestões

7.1 Considerações finais e conclusões do estudo

Muitas pontes metálicas são um testemunho vivo de acontecimentos importantes, que estão directamente relacionados com o desenvolvimento tecnológico e industrial e a evolução da nossa história. Este facto, aliado às vantagens económicas da reparação/reforço e às novas exigências de sustentabilidade ambiental e de construção, torna recomendável continuar a preservar este legado histórico para gerações futuras.

As pontes metálicas podem apresentar uma boa durabilidade, como é possível verificar em pontes com mais de um século que continuam no activo. No entanto, é essencial uma manutenção periódica, com a adopção de métodos adequados de avaliação, reparação e protecção.

Uma das vantagens da construção metálica é o facto do material estrutural estar à vista, tornando mais fácil a avaliação de possíveis danos através de métodos directos, tais como a inspecção visual. O desenvolvimento avançado de métodos não destrutivos também permite um diagnóstico mais correcto e consequente adopção atempada de medidas de correcção adequadas.

A reparação de estruturas metálicas está muito dependente da experiência dos engenheiros e técnicos de manutenção e da transmissão desse conhecimento. Esta situação pode ser verificada através de alguma falta de informação sobre normas europeias que têm vindo a ser desenvolvidas nesta área. Por esta razão, todos os trabalhos de compilação da informação existente são muito importantes, de modo a ser possível elaborar manuais que, eventualmente, sirvam de base a esta normalização. Este é um dos objectivos do Projecto DURATINET – *Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Area Network* (<http://www.duratinet.org/>), no âmbito do qual foi desenvolvida esta dissertação.

O primeiro sistema de protecção contra corrosão a ser utilizado nas pontes metálicas foi a pintura com tintas à base de chumbo, proporcionando uma protecção excelente contra corrosão e garantindo uma longa durabilidade do material destas estruturas. No entanto, este tipo de pintura tem consequências nefastas ao ambiente e à saúde pública e foi gradualmente substituído por outros sistemas. Infelizmente, a maioria destes sistemas apresenta menos vantagens, principalmente na relação de capacidade protectora/custo.

Actualmente são utilizados aços designados como de elevado desempenho, com características optimizadas ao nível da resistência, soldabilidade e de protecção contra a corrosão atmosférica. Alguns destes materiais são muito interessantes, devido à não exigência de sistemas de protecção, como, por exemplo, os aços patináveis (*weathering steel*), que no entanto não são aconselhados para ambientes agressivos.

Relativamente à sustentabilidade da construção metálica, temos como principal constituinte do aço o ferro, um elemento que existe em grande quantidade na crosta terrestre e que é totalmente reciclável.

7.2 Propostas de desenvolvimento futuro

Particularmente em Portugal, temos um grande património em pontes metálicas e seria interessante a compilação de informação sobre estas obras de arte, de modo a ser possível apresentar propostas adequadas de reabilitação, tanto para as pontes activas como para as desactivadas e com importante valor histórico, como, por exemplo, a ponte D. Maria Pia.

Estas propostas de reabilitação convém serem acompanhadas por uma avaliação rigorosa das características dos materiais utilizados na época, pois existe alguma falta de informação, principalmente em relação ao comportamento à fadiga de materiais como o ferro pudelado, material estrutural de muitas pontes metálicas portuguesas. A proposta seria, então, a de realização de um estudo sistemático do comportamento à fadiga comparativo entre estruturas, bem como do ferro pudelado, a partir de amostras retiradas de pontes antigas, com o objectivo de elaborar recomendações para a preservação destas estruturas.

Ainda na área da avaliação, é importante o desenvolvimento de ensaios não destrutivos cada vez mais simples, que permitam uma caracterização otimizada dos materiais e, assim, evitar a recolha de amostras necessárias aos denominados ensaios destrutivos. Esta situação torna-se pertinente em caso de eventuais avaliações incorrectas devido à não realização de ensaios, seja pela impossibilidade de recolha de amostras ou pelo custo elevado dos ensaios exigidos.

Conforme se pode verificar, existe alguma falta de harmonização nos procedimentos de reparação de pontes metálicas, particularmente porque a maioria dos métodos não estão normalizados. A investigação detalhada dos diferentes métodos de reparação pode contribuir significativamente para a elaboração de normas que permitam uma melhor adequação da reparação aos danos existentes.

Relativamente aos sistemas de protecção, assiste-se a uma restrição cada vez maior dos produtos, particularmente nas emissões de VOCs (*Volatile Organic Compounds*). As novas exigências de sustentabilidade ambiental recomendam o desenvolvimento de novos sistemas de protecção, que possam dar uma melhor resposta aos requisitos ambientais e de saúde pública e que proporcionem uma aplicabilidade simples e durabilidade idêntica ou superior à anterior. Os novos desenvolvimentos ao nível de revestimentos nanoestruturados constituem áreas de grande potencial, no âmbito da protecção de estruturas metálicas contra a corrosão.

8. Referências

- [1] <http://en.structurae.de/index.cfm>
- [2] M. R. F. Martins, M. T. P. Torres, P. C. M. Freire. Pontes Metálicas Rodoviárias. Europress, Editores e Distribuidores de Publicações, Lda. MEPAT. SEOP, Junta Autónoma de Estradas. 1998.
- [3] J. D. de Andrade Gil. Pontes Metálicas Ferroviárias. Artigo apresentado no Encontro Nacional de Construção Metálica e Mista.
- [4] H. Perneta, M.J. Correia, A.M. Baptista, M. Salta. Artigo apresentado no REABILITAR 2010 – Encontro Nacional de Conservação e Reabilitação de Estruturas.
- [5] A. Baptista, B. Tersin. *La rehabilitation des structures métalliques*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. CUST. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.
- [6] Hélder Carita. Homem Cardoso. Pontes em Portugal. SECIL.
- [7] *EN 12500:2000. Protection of metallic materials against corrosion. Corrosion likelihood in atmospheric environment. Classification, determination and estimation of corrosivity of atmospheric environments.*
- [8] *ISO 9223:1992. Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification.*
- [9] NP EN ISO 12944-2:1999 . Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 2: Classificação de ambientes (ISO 12944-2:1998).
- [10] B. Kühn, M. Lukić, A. Nussbaumer, H.-P. Günther, R. Helmerich, S. Herion, M.H. Kolstein, S. Walbridge, B. Androic, O. Dijkstra, Ö. Bucak. *Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life*. JRC Scientific and Technical Reports. Ed. by G. Sedlacek, F. Bijlaard, M. Gérardin, A. Pinto and S. Dimova. Joint Research Center, European Commission. First Edition, February 2008.
- [11] NP EN 1993-1-9:2010. Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço. Parte 1-9: Fadiga.
- [12] *Defects in railway bridges and procedures for maintenance. UIC Code 778-4 R. 1st Edition, 01.07.1989.*
- [13] NP EN ISO 4628-1:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 1: Introdução geral e sistema de designação (ISO 4628-1:2003).
- [14] NP EN ISO 4628-2:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 2: Avaliação do grau de empolamento (ISO 4628-2:2003).
- [15] NP EN ISO 4628-3:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 3: Avaliação do grau de enferrujamento (ISO 4628-3:2003).
- [16] NP EN ISO 4628-4:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 4: Avaliação do grau de fissuração (ISO 4628-4:2003).

- [17] NP EN ISO 4628-5:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 5: Avaliação do grau de descamação (ISO 4628-5:2003).
- [18] *EN ISO 4628-6:2007. Paints and varnishes. Evaluation of degradation of coatings - Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance. Part 6: Assessment of degree of chalking by tape method (ISO 4628-6:2007).*
- [19] NP EN ISO 4628-7:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 7: Avaliação do grau de pulverulência pelo método do tecido aveludado (ISO 4628-7:2003).
- [20] NP EN ISO 4628-8:2007. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos por pintura Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 8: Avaliação do grau de delaminação e corrosão em volta de um corte (ISO 4628-8:2005).
- [21] NP EN ISO 4628-10:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 10: Avaliação do grau de corrosão filiforme (ISO 4628-10:2003).
- [22] *K.J. Kirkhope, R. Bell, L.Caron, R.I.Basu, K.-T. Ma. Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review. Mar. Struct. 12 (1999) 447-474.*
- [23] *G.O. Shanafelt, W.B. Horn. Guidelines for Evaluation and Repair of Damaged Bridge Members. National Cooperative Highway Research Program 271 Report. Transportation Research Board. October 1989.*
- [24] *E. N. Gregory, G. Slater, and C. C. Woodley. Welded Repair of Cracks in Steel Bridge Members. National Cooperative Highway Research Program 321 Report. Transportation Research Board. October 1989.*
- [25] *Inspection, Evaluation, and Repair of Hydraulic Steel Structures; Engineering and Design. Engineer Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Department of Army. December, 2001.*
- [26] *Y. Yin and X. L. Liu, Numerical study on fatigue repair of structural steel with stop hole related techniques, Advances in Steel Structures. Ed. by Z. Y. Shen, G.Q. Li and S. L. Chan. ICASS '05. Volume 2, Elsevier, 2005.*
- [27] A. Murdani, C. Makabe, A. Saimoto, Y. Irei, T. Miyazaki. Stress Concentration at Stop-Drilled Holes and Additional Holes. Eng. Fail. Anal. 15 (2008) 810-819.
- [28] ISO/TR 581:2005. *Weldability. Metallic Materials. General Principles.*
- [29] *Bridge Inspection, Maintenance and Repair. Joint Departments of the Army and Air Force. TM 5-600/AFJPAM 32-1088.*
- [30] EN 1090-2:2008. *Execution of steel structures and aluminium structures. Part 2: Technical requirements for the execution of steel structures.*
- [31] NP EN 1993-1-8:2010. Eurocódigo 3. Projecto de estruturas de aço. Parte 1-8: Projecto de ligações.
- [32] EN 14399-1:2005. Elementos de ligação roscados de construção de alta resistência aptos a pré-esforço. Parte 1: Requisitos gerais.
- [33] EN 14399-3:2005. *High-strength structural bolting assemblies for preloading. Part 3: System HR – Hexagon bolt and nut assemblies.*
- [34] EN 14399-4:2005. Elementos de ligação roscados de construção de alta resistência aptos a pré-esforço. Part 4: Sistema HV – Ligações parafuso-porca hexagonais.

- [35] EN 14399-5:2005. *High-strength structural bolting assemblies for preloading. Part 5: Plain washers.*
- [36] EN 14399-6:2005. *High-strength structural bolting assemblies for preloading. Part 6: Plain chamfered washers.*
- [37] EN ISO 898-1:2009. *Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel. Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes.*
- [38] G.O. Shanafelt, W.B. Horn. *Guidelines for Evaluation and Repair of Damaged Bridge Members. National Cooperative Highway Research Program 271 Report. Transportation Research Board. October 1989.* EN 1090-2: 2008; *Execution of steel structures and aluminium structures. Part 2: Technical requirements for the execution of steel structures.*
- [39] W. Radomski. *Bridge Rehabilitation. Warsaw University of Technology, Poland. Imperial College Press, 2002.*
- [40] R. R. Avent and D. Mukai; *Heat-straightening repairs of damaged steel bridges - a technical guide and manual of practice; U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration (1998) Washington.*
- [41] *Guide for Heat-Straightening of Damaged Steel Bridge Members; Federal Highway Administration; <http://www.fhwa.dot.gov/BRIDGE/steel/>*
- [42] A. Shaat, D. Schnerch, A. Fam, S. Rizkalla; *Retrofit of Steel Structures using Fiber Reinforced Polymers (FRP): State-of-the-Art; 2003.*
- [43] L.C. Hollaway and J. Cadei. *Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. Prog. Struct. Eng. Mater. 4 (2002) 131-148.*
- [44] EN 12954:2001. *Cathodic protection of buried or immersed metallic structures - General principles and application for pipelines.*
- [45] EN 14505:2005. *Cathodic protection of complex structures.*
- [46] EN 12473:2000. *General principles of cathodic protection in sea water.*
- [47] EN 13174:2001. *Cathodic protection for harbour installations.*
- [48] D.A. Bayliss, D.H. Deacon. *Steelwork Corrosion Control. 2nd Edition. Spoon Press. London, 2002.*
- [49] EN ISO 12944-5:2007. *Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Part 5: Protective systems (ISO 12944-5: 2007).*
- [50] EN ISO 3549:2002. *Zinc dust pigments for paints. Specifications and test methods (ISO 3549:1995).*
- [51] ASTM D2371:2005. *Standard test method for pigment content of solvent-reducible paints.*
- [52] EN ISO 14713-2:2009. *Zinc coatings. Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel structures. Part 2: Hot dip galvanizing (ISO 14713-2:2009).*
- [53] EN ISO 10684:2005. *Fasteners. Hot dip galvanized coatings (ISO 10684:2004).*
- [54] EN 13438:2005. *Paints and varnishes. Powder organic coatings for galvanized or sherardized steel products for construction purposes.*
- [55] NP EN ISO 12944-2:1999. *Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 2: Classificação de ambientes (ISO 12944-2:1998).*

- [56] *EN ISO 12944-1:1998. Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Part 1: General introduction (ISO 12944-1:1998).*
- [57] *EN ISO 14713-1:2009. Zinc coatings. Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel structures. Part 1: General principles of design and corrosion resistance (ISO 14713-1:2009).*
- [58] NP EN ISO 8504-1:2003. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Métodos de preparação de superfícies. Parte 1: Princípios gerais (ISO 8504-1:2000).
- [59] NP EN ISO 8504-2:2003. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Métodos de preparação de superfícies. Parte 2: Decapagem por projecção de abrasivos (ISO 8504-2:2000).
- [60] NP EN ISO 8504-3:2003. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Métodos de preparação de superfícies. Parte 3: Limpeza com ferramentas manuais e mecânicas (ISO 8504-3:1993).
- [61] *EN ISO 8501-1:2007. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Visual assessment of surface cleanliness. Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings (ISO 8501-1: 2007).*
- [62] *EN ISO 8501-2:2001. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Visual assessment of surface cleanliness. Part 2: preparation grades of previously coated steel substrates after localized removal of previous coatings (ISO 8501-2: 1994).*
- [63] *EN ISO 8501-3:2007. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Visual assessment of surface cleanliness. Part 3: Preparation grades of welds, edges and other areas with surface imperfections (ISO 8501-3:2006).*
- [64] *EN ISO 8501-4:2006. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Visual assessment of surface cleanliness. Part 4: Initial surface conditions, preparation grades and flush rust grades in connection with high-pressure water jetting.*
- [65] *EN ISO 8502-2:2005. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 2: Laboratory determination of chloride on cleaned surfaces (ISO 8502-2: 2005).*
- [66] *EN ISO 8502-3:1999. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 3: Assessment of dust on steel surfaces prepared for painting (pressure-sensitive tape method) (ISO 8502-3: 1992).*
- [67] *EN ISO 8502-4:1999. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 4: Guidance on the estimation of the probability of condensation prior to paint application (ISO 8502-4: 1993).*
- [68] *EN ISO 8502-5:2004. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 5: Measurement of chloride on steel surfaces prepared for painting (ion detection tube method) (ISO 8502-5: 1998).*
- [69] *EN ISO 8502-6:2006. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 6: Extraction of soluble contaminants for analysis. The Bresle method (ISO 8502-6: 2006).*

- [70] *EN ISO 8502-8:2006. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 8: Field method for the refractometric determination of moisture (ISO 8502-8: 2001).*
- [71] *EN ISO 8502-9:2000. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 9: Field method for the conductometric determination of water-soluble salts (ISO 8502-9: 1998).*
- [72] *EN ISO 8502-11:2006. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 11: Field method for the turbidimetric determination of water-soluble sulphate (ISO 8502-11: 2006).*
- [73] *EN ISO 8502-12:2004. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 12: Field method for the titrimetric determination of water-soluble ferrous ions (8502-12: 2003).*
- [74] *EN ISO 8503-1:1995. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface roughness characteristics of blasted-cleaned steel substrates. Part 1: Specifications and definitions for ISO surface profile comparators for the assessment of abrasive blast-cleaned surfaces (ISO 8503-1: 1988).*
- [75] *EN ISO 8503-2:1995. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface roughness characteristics of blasted-cleaned steel substrates. Part 2: Method for the grading of surface profile of abrasive blast-cleaned steel. Comparator procedure (ISO 8503-2: 1988).*
- [76] *EN ISO 8503-3:1995. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface roughness characteristics of blasted-cleaned steel substrates. Part 3: Method for the calibration of ISO surface profile comparators and for the determination of surface profile. Focusing microscope procedure (ISO 8503-3:1988).*
- [77] *EN ISO 8503-4:1995. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface roughness characteristics of blasted-cleaned steel substrates. Part 4: Method for the calibration of ISO surface profile comparators and for the determination of surface profile. Stylus instrument procedure (ISO 8503-4:1988).*
- [78] *EN ISO 8503-5:1995. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface roughness characteristics of blasted-cleaned steel substrates. Part 5: Replica tape method for the determination of the surface profile (ISO 8503-5:2003).*
- [79] NP EN ISO 12944-4:1999. Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 4: Tipos de superfície e de preparação de superfície (ISSO 12944-4:1998).
- [80] *EN ISO 2063:2005. Thermal spraying. Metallic and other inorganic coatings. Zinc, aluminium and their alloys (ISO 2063:2005).*
- [81] NP EN ISO 4628-3:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 3: Avaliação do grau de enferrujamento (ISSO 4628-3:2003).
- [82] NP EN ISO 4628-4:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 4: Avaliação do grau de fissuração (ISSO 4628-4:2003).

- [83] NP EN ISO 4628-5:2005. Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 5: Avaliação do grau de descamação (ISSO 4628-5:2003).
- [84] NP EN ISO 11124-1:1998. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos metálicos para decapagem por projecção. Parte 1: Introdução geral e classificação (ISO 11124-1:1993).
- [85] NP EN ISO 11124-2:1998. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos metálicos para decapagem por projecção. Parte 2: Granalha angular de ferro regelado (ISO 11124-2:1993).
- [86] NP EN ISO 11124-3:1998. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos metálicos para decapagem por projecção. Parte 3: Granalha esférica e angular de aço vazado de alto teor de carbono (ISO 11124-3:1993).
- [87] NP EN ISO 11124-4:1998. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos metálicos para decapagem por projecção. Parte 4: Granalha esférica de aço vazado de baixo teor de carbono (ISO 11124-4:1993).
- [88] NP EN ISO 11126-1:2003. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 1: Introdução geral e classificação (ISO 11126-1:1993, incluindo Corrigendas Técnicas 1:1997 e 2:1997).
- [89] NP EN ISO 11126-3:2003. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 3: Escória da refinação do cobre (ISO 11126-3:1993).
- [90] NP EN ISO 11126-3:2003/Errata Set:2004. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 3: Escória da refinação do cobre (ISO 11126-3:1993).
- [91] NP EN ISO 11126-4:2004. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 4: Escória de caldeira a carvão (ISO 11126-4:1993).
- [92] NP EN ISO 11126-5:2004. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 5: Escória de refinação do níquel (ISO 11126-5:1993).
- [93] NP EN ISO 11126-6:2004. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 6: Escória de fundição do ferro (ISO 11126-6:1993).
- [94] NP EN ISO 11126-7:2004. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 7: Óxido de alumínio fundido (ISO 11126-7:1995).
- [95] NP EN ISO 11126-8:2003. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 8: Areia de olivina (ISO 11126-8:1993).
- [96] NP EN ISO 11126-8:2003/Errata Set:2004. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não

- metálicos para decapagem por projecção. Parte 8: Areia de olivina (ISO 11126-8:1993).
- [97] EN ISO 11126-9:2004. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Specifications for non-metallic blast-cleaning abrasives. Part 9: Staurolite (ISO 11126-9:1999).
- [98] NP ISO 11126-10:2003. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 10: Granada almandite (ISO 11126-10:2000).
- [99] NP ISO 11126-10:2003/Errata Set:2004. Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos similares. Especificação de abrasivos não metálicos para decapagem por projecção. Parte 10: Granada almandite (ISO 11126-10:2000).