

REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS



Hugo Pernaut

Bolseiro de Investigação

LNEC
Lisboa
hperneta@lnec.pt



Maria João Correia

Bolseira de
Pós-Doutoramento

LNEC
Lisboa
mjmcorreia@lnec.pt



António M. Baptista

Investigador Principal

LNEC
Lisboa
ambaptista@lnec.pt



Manuela Salta

Investigadora
Coordenadora

LNEC
Lisboa
msalta@lnec.pt

SUMÁRIO

Em Portugal existe um património muito significativo no que se refere a pontes metálicas ferroviárias e rodoviárias, muitas das quais constituem já um legado histórico apreciável. Há, portanto, não só que continuar a preservar este património histórico mas também garantir que as pontes mais recentes possam vir a apresentar desempenhos idênticos ou mesmo superiores. Nesta comunicação, após um enquadramento histórico da evolução nos processos siderúrgicos e sua correlação com a construção metálica em especial de pontes metálicas, faz-se uma sistematização dos principais processos de degradação do aço estrutural e das causas dos danos mais frequentes nestas estruturas, e apresentam-se as técnicas que podem ser utilizadas durante a manutenção em serviço destas pontes, para a identificação e avaliação dos danos existentes, e os métodos de reparação/protecção adequados aos danos mais frequentes.

Palavras-chave: pontes metálicas, aço estrutural, mecanismos de degradação, danos, corrosão, fadiga, reparação, protecção.

1 INTRODUÇÃO

Em Portugal e em geral na Europa existe um património muito significativo no que se refere a pontes metálicas ferroviárias e rodoviárias, muitas das quais constituem já um legado histórico apreciável. Há, portanto, não só que continuar a preservar o património das pontes metálicas históricas, que conta com exemplares ainda funcionais com idade já superior a 100 anos, mas também garantir que as pontes mais recentes possam vir a apresentar desempenhos idênticos ou mesmo superiores.

Na generalidade as estruturas metálicas expostas em ambiente exterior e especificamente as pontes metálicas podem sofrer diferentes tipos de patologia. Os principais mecanismos de degradação do aço estrutural podem ser agrupados essencialmente em processos físicos, químicos e biológicos. Os mecanismos químicos e biológicos traduzem-se principalmente na corrosão do aço. Os mecanismos de degradação física compreendem os diversos fenómenos físicos que originam a diminuição da sua resistência e da funcionalidade da estrutura, tais como os fenómenos de instabilidade, de deformação excessiva ou de fadiga.

Para além dos processos que provocam a degradação do aço estrutural, são igualmente relevantes os processos de deterioração dos próprios sistemas de protecção pelas consequências no comportamento à corrosão do material metálico. Muitas das causas da deterioração estão também associadas a erros de pormenorização do projecto, a erros de construção ou mesmo de utilização.

Um factor fundamental na elaboração dum plano de reparação é a avaliação prévia da condição da estrutura, a qual deve contemplar o diagnóstico completo dos danos, incluindo tipo de dano e extensão, a identificação das causas e a análise da influência dos factores ambientais e condições de corrosividade locais no aparecimento desses danos.

Nesta comunicação, após ser feito um enquadramento histórico da evolução nos processos siderúrgicos e nas tecnologias das ligações e sistemas de protecção das estruturas metálicas e sua correlação com a evolução na construção das pontes metálicas, apresenta-se uma sistematização dos principais processos de degradação do aço estrutural e das causas dos danos mais frequentes nestas estruturas, e apresentam-se as técnicas que podem ser utilizadas durante a manutenção em serviço destas pontes, para a identificação e avaliação dos danos existentes, e os métodos de reparação/protecção mais adequados a cada tipo de dano. São ainda feitas algumas considerações sobre as medidas preventivas para minimizar a ocorrência de danos no aço estrutural e nos sistemas de protecção das pontes metálicas, de modo a melhorar o seu desempenho e permitir que atinjam longos tempos de vida em serviço com baixos custos de manutenção.

2 ALGUNS DADOS SOBRE EVOLUÇÃO HISTÓRICA

2.1 A evolução nas ligas de ferro

O início da construção de pontes metálicas coincide com o aparecimento do ferro fundido e remonta ao final do séc. 18. Apesar da fraca resistência à tracção dos ferros fundidos mas devido às suas características de resistência à compressão, foi possível produzir segmentos

de ferro fundido moldados de acordo com os desenhos do projecto que depois de ligados entre si constituíam elementos em arco das pontes. A primeira ponte em ferro fundido foi construída em 1779 perto de Coalbrookdale no Reino Unido (Fig.1), a qual ainda existe no local embora tenha já sido objecto de reabilitação.

Após os desenvolvimentos tecnológicos introduzidos por Henry Cort a partir de 1784 foi possível produzir o ferro pudelado resultante do processo de pudelagem, por vezes também designado na literatura inglesa por ferro forjado (wrought iron). Este material apresenta um teor em carbono muito baixo, um elevado conteúdo de escórias e uma estrutura lamelar, características que lhe conferem uma fraca ductilidade mas uma razoável resistência à tracção, permitindo o fabrico de chapas, perfis ou barras, com dimensões de acordo com o fabricante mas que não ultrapassavam mais de 1 m, com características mais ajustadas à construção de pontes. Desde 1776 até por volta de 1840, os ferros fundido e pudelado, com propriedades mecânicas que de algum modo se complementavam nas suas utilizações, foram os materiais por excelência utilizados na construção de pontes metálicas com ligações rebitadas. Ambas as ligas ferrosas apresentavam, embora por razões diferentes, uma boa resistência à corrosão, superior à do aço posteriormente desenvolvido, facto que também deve ter contribuído para que algumas daquelas pontes construídas na época ainda perdurem na actualidade. No entanto, pelo facto da produção dos ferros pudelados envolver a refusão da gusa em cadinhos de pequena dimensão, o processo era pouco adequado à obtenção de produções para obras de grandes dimensões conduzindo a variações nas propriedades e características do material de um vazamento para outro, o que, na época, limitou uma maior utilização do ferro na construção de pontes e introduziu uma natural dispersão da qualidade e das propriedades do material numa mesma estrutura.

A invenção e o desenvolvimento do processo siderúrgico Bessemer, em 1855, permitiu a produção do aço com propriedades melhoradas relativamente às dos ferros pudelados e com maior capacidade para a produção de produtos um pouco mais longos, inicialmente com cerca de 5 m e posteriormente podendo atingir os 10 m, embora com características ainda muito diferentes das dos aços estruturais actuais devido ao elevado teor de inclusões de sulfuretos. A Ponte D. Maria no Porto (Fig.2), construída em 1877 é a primeira ponte de ferro pudelado em arco construída na Europa.

No que se refere ao desempenho à corrosão, os aços macios apresentam uma menor resistência à corrosão que os ferros fundidos e os pudelados o que implica que na sua utilização em pontes devam ser necessariamente aplicados sistemas de protecção contra corrosão.

Na transição do séc. XIX para o séc. XX, novos e importantes desenvolvimentos se processaram na indústria siderúrgica, com o surgimento dos processos Thomas e Siemens–Martin, que permitiram a produção em massa de aços mais limpos e com melhores características, possibilitando assim dar resposta à grande necessidade de construção de pontes ferroviárias devido ao desenvolvimento dos transportes ferroviários em toda a Europa (Fig.3 e 4). Ao longo do séc. XX, continuaram progressos na siderurgia do aço com o desenvolvimento de novos tipos de aço com resistência e ductilidade progressivamente mais elevada (Fig.4): incrementando os teores de carbono e silício para permitir o

endurecimento; actuando na dosagem de manganês para aumentar a temperabilidade de modo a se obter uma estrutura mais fina passando-se dos aços do tipo S240 (%C=0,08, %Mn=1,00, %Si=0,20) para S360 (%C=0,18, %Mn= 1,55, %Si=0,45);e sucessivamente através da introdução de elementos de liga (Ni, Cr, Cu, Mo e V) que permitem um endurecimento à custa da precipitação de fases dando origem aos tipos de aço S355N a S420N e S460N [1]-[6]. Entre estes novos tipos de aço salientam-se os aços patináveis (*weathering steels*) com incorporação do cobre como elemento de liga que confere uma boa estabilidade dos produtos de corrosão e por isso uma boa resistência à corrosão atmosférica.



Figura 1. Ponte de Coalbrookdale, 1779.

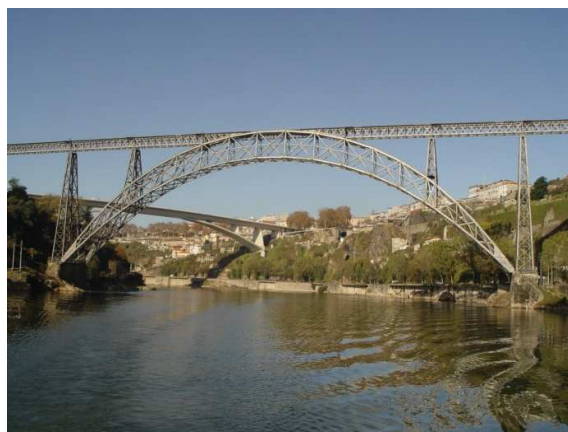


Figura 2. Ponte de Maria no Porto, 1877.

Os desenvolvimentos dos aços fracamente ligados a partir de 1960 conduziram aos aços designados de alto resistência e desempenho (*High performance steel, HPS*), com uma excelente tenacidade e ductilidade, boa soldabilidade e simultaneamente elevada resistência à corrosão, permitindo o desenvolvimento de projectos de pontes inovadores, e com significativa redução do seu peso e custos. A incorporação na composição destes aços de alta resistência dos elementos de liga Cu, Cr e Ni, permite a estabilização dos óxidos formados por corrosão conferindo-lhe capacidade de protecção, mesmo superior às dos aços designados por patináveis de menor resistência, especialmente em condições de exposição atmosférica. Esta característica dos aços de alto desempenho, permite a sua utilização sem necessitarem de revestimentos de protecção, em determinadas condições de agressividade de exposição ambiental, e consequentemente reduzir significativamente os custos de manutenção destas pontes.

No entanto, durante a primeira e a segunda guerra mundial e durante a grande recessão (1929-1939) o ritmo muito acelerado na produção do aço pode ter tido algumas consequências na qualidade dos aços produzidos nestes períodos, pelo que as pontes construídas nestas épocas poderão apresentar alguns problemas no desempenho a longo prazo, sobretudo à medida que aumentam as cargas actuantes a que passam a estar sujeitas, devido a possíveis deficiências na qualidade do aço.

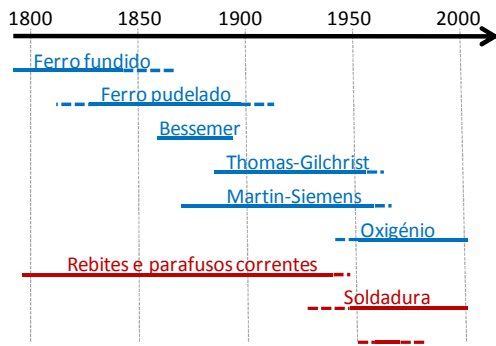


Figura 3. Evolução nos processos siderúrgicos e tecnologia das ligações (adaptado de [7])

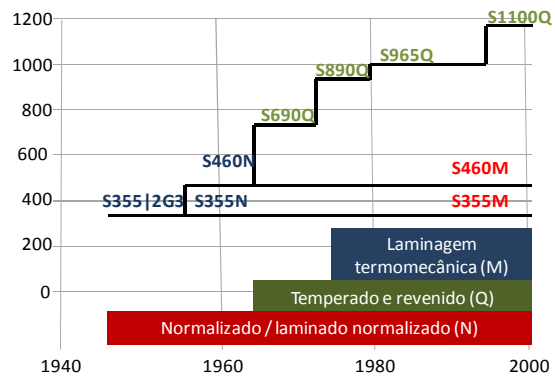


Figura 4 -Evolução dos tipos de aço (adaptado de [7])

2.2 Evolução no tipo de ligações e nos sistemas de protecção do aço

Acompanhando estas evoluções na indústria siderúrgica do aço, a partir de 1935 verificaram-se também evoluções ao nível do tipo de ligações dos elementos metálicos, com o recurso a parafusos correntes e a diminuição do uso das ligações rebitadas, que vinham a ser utilizadas desde o início da construção de pontes metálicas, e o aparecimento dos parafusos de alta resistência e, especialmente a partir de 1950, com o desenvolvimento dos processos de soldadura em oficina e em obra, que permitiram dar resposta a solicitações muito superiores às das ligações rebitadas ou mesmo aparafusadas. Apesar de todo o desenvolvimento que se verificou na qualidade dos aços estruturais por via das melhorias introduzidas na indústria siderúrgica, o aparecimento das ligações soldadas veio aumentar as situações de risco de ocorrência dos processos de fissuração progressiva por fadiga. Num estudo citado em [8] concluiu-se que particularmente no período de 1955 e 1984, ocorreram algumas falhas e colapsos em estruturas metálicas, sendo que cerca de 25% dos casos das falhas ocorreram em pontes rodoviárias e ferroviárias, na maioria com menos de 30 anos de construção, tendo sido identificada como principal causa a fissuração por fadiga. Esta constatação não pode ser dissociada, por um lado, da fraca qualidade que apresentavam inicialmente os processos de soldadura, posteriormente melhorada com o desenvolvimento de normas com os requisitos de execução e inspecção, e, por outro, do facto de algumas destas pontes terem sido construídas em períodos do pós guerra, durante a qual a qualidade dos aços produzidos poderá ter sofrido algumas perturbações.

Desde o início da construção de pontes metálicas de aço que os sistemas de pintura com tintas à base de chumbo foram utilizados na sua protecção, com um excelente desempenho, permitindo que, na generalidade, e desde que submetidas a manutenções periódicas, as mesmas tivessem uma durabilidade superior a 100 anos sob variadas condições de exposição e classes de corrosividade ambiental. A “Firth of Forth railroad bridge”, construída em 1890 na Escócia, é uma das pontes que, de acordo com os registos existentes, desde a sua construção foi protegida com sistemas de pintura à base de chumbo, Fig. 5 a) [9].



(a)



(b)

Figura 5. (a) Firth of Forth railroad bridge, 1890; (b) ponte em aço patinável

No entanto, a partir de 1970, por razões ecológicas e de saúde este tipo de tintas foi proibido pelo que se iniciou a produção de novos sistemas. Para além dos revestimentos por pintura, os revestimentos metálicos de zinco e os revestimentos duplos de zinco e pintados são os sistemas de protecção anticorrosiva mais utilizados na protecção do aço.

Embora os aços patináveis (*weathering steel* ou também vulgarmente conhecido pela designação comercial Corten) tenham tido pouca utilização na construção de pontes na Europa, nos estados Unidos têm sido muito utilizados, particularmente em zonas afastadas do ambiente marítimo e industrial, dada a vantagem de não necessitarem da aplicação de sistemas de protecção, Fig. 5 b).

A protecção recorrendo ao uso de revestimentos metálicos de zinco é uma solução que apresenta uma boa durabilidade para estruturas aéreas de formas simples e em exposição atmosférica na generalidade dos ambientes, mas, devido às alterações cromáticas do zinco quando exposto à atmosfera, apresenta algumas desvantagens do ponto de vista estético pelo que a sua utilização é normalmente complementada com a aplicação de uma pintura, formando um revestimento tipo duplex que permite prolongar a durabilidade da protecção.

Mais recentemente surgiram também as restrições nos conteúdos em compostos orgânicos voláteis (VOC's) nos sistemas por pintura que levou ao desenvolvimento de tintas de solvente aquoso com vista à protecção metálica.

3 PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DAS PONTES METÁLICAS

A deterioração das pontes metálicas está frequentemente associada a processos de **degradação física** resultantes de impactos ou sobrecargas acidentais, de fenómenos de fadiga decorrentes de solicitações cíclicas e processos de **degradação por reacções químicas e biológicas** como é o caso da corrosão, que nalgumas situações pode ser acelerada pela actividade microbiológica ou pela perda da acção protectora do sistema de protecção anti-corrosiva devido ao seu envelhecimento e degradação. Os mecanismos de corrosão podem ainda ser potenciados pela inadequação de pormenores de desenho ou de construção ou ainda por utilizações menos adequadas que também podem contribuir para acelerar os fenómenos de corrosão do aço.

3.1 Processos químicos e biológicos - Corrosão do aço

Corrosão é o processo natural de deterioração dum metal ou liga em consequência da sua reacção com o meio ambiente, sendo o tipo de corrosão dependente dos mecanismos envolvidos no processo e das características ambientais. A corrosão do aço é normalmente classificada como do tipo uniforme ou localizada quando corresponde respectivamente a um ataque generalizado ou localizado da superfície metálica, Fig. 6. A corrosão localizada pode manifestar-se sob diversas formas, tais como picadas, que normalmente ocorrem na presença de elementos agressivos como é o caso dos cloretos, do tipo intersticial que se desenvolve em espaços confinados nas interfaces de sobreposição de chapas ou noutros tipos de interstícios e do tipo galvânica devido ao contacto de metais diferentes.



Figura 6. (a) Corrosão uniforme e (b) localizada do tipo intersticial com características selectivas (follheamento) em estruturas de aço

Se em simultâneo com a corrosão actuarem tensões estáticas ou dinâmicas podem dar origem a fenómenos de corrosão sob tensão ou diminuir a resistência à fadiga, diminuindo a tensão necessária à iniciação e propagação da fissura e/ou ao aumento da sua velocidade de crescimento.

Para prevenir os mecanismos de corrosão sob tensão ou a deterioração por acção mista da corrosão e da fadiga é essencial a aplicação de técnicas de tratamento de superfície, a redução de tensões, a selecção do tipo de aço menos sensível a mecanismos de fadiga (com redução do hidrogénio durante o processamento do seu fabrico ou durante a aplicação de tratamentos metálicos de superfície).

A resistência à corrosão é determinada pela composição e microestrutura do material, para além da acção ambiental.

As características metalográficas, determinadas pelas fronteiras de grão, existência de fases e de inclusões podem condicionar significativamente o comportamento à corrosão do material. As fronteiras de grão correspondem a descontinuidades estruturais e eventualmente a diferenças químicas que podem actuar como locais preferenciais para a nucleação de fenómenos de corrosão localizada. A coexistência de diferentes fases com diferente estabilidade e as inclusões, especialmente, de sulfuretos e de escórias, podem promover a corrosão selectiva do metal, em determinados meios.

Os ferros fundidos como possuem um elevado conteúdo em carbono sob diferentes formas, nomeadamente grafite, carbonetos e cementite, podem ser susceptíveis à corrosão selectiva, mas a sua resistência à corrosão uniforme é em geral melhorada devido ao elevado teor de carbono nos produtos de corrosão. Já no caso dos ferros pudelados a boa resistência à corrosão é devida ao elevado conteúdo em escórias não reactivas.

O comportamento à corrosão das ligas ferrosas, para além de depender das características da liga, é fortemente condicionado pelas condições de exposição.

3.2 Corrosividade do ambiente de exposição

O conhecimento das características de corrosividade do ambiente de exposição numa estrutura bem com das condições climáticas macro e microambientais actuantes nos diferentes elementos, são determinantes para se identificarem as causas da deterioração e sobretudo se adequarem os métodos de reparação e conservação a essas condições, de modo a obter o melhor desempenho.

O ambiente envolvente numa estrutura influencia significativamente a velocidade de corrosão do aço, sendo determinante na escolha do método de reparação e/ou protecção das estruturas metálicas. Com base na ocorrência dos principais agentes corrosivos a atmosfera é classificada como rural, urbana, industrial, marítima e marítima/industrial.

Para além da localização macroclimática, o ambiente local e o microambiente são também decisivos na resistência à corrosão do aço. As características destes microambientes são determinadas por diversos factores fundamentais, tais como o tipo de ambiente e classe de exposição, factores meteorológicos, poluentes atmosféricos, pormenorização do projecto e da construção e condições de operação do elemento.

As condições microclimáticas criadas em consequência da geometria e posicionamento do elemento podem criar condições de maior vulnerabilidade à aceleração dos fenómenos de corrosão, como seja o caso de zonas de condensação, de retenção de água ou detritos, de desgaste do sistema de protecção por abrasão ou de exposição a factores agravantes da corrosão nomeadamente por acção microbiológica, Fig 7.



Figura 7. Aceleração da corrosão em zonas microclimáticas na estrutura: (a) zonas de condensação da humidade atmosférica; (b) zonas de retenção de água e detritos.

De acordo com as especificações da norma ISO 9223 [10], as classes de corrosividade atmosférica podem ser determinadas pelos factores ambientais, ou seja pelo tempo de molhagem e nível de poluição, ou ser baseadas em medidas de velocidade de corrosão de metais padrão, tal como se exemplifica no Quadro 1 para o aço.

Com base na metodologia de classificação da corrosividade atmosférica diversos países já têm definido mapas das regiões com as classificações de corrosividade como é o caso do mapa de corrosividade atmosférica da Península Ibérica.

A corrosividade da água e dos solos é determinada por diversas variáveis, tais como, acidez, condutividade ou resistividade, e presença de espécies iónicas e agentes biológicos. Em particular na água do mar são definidas cinco zonas de exposição que caracterizam velocidades variáveis de corrosão dos elementos metálicos em função da distância ao nível médio de maré, Fig. 8. A resistividade é usualmente utilizada para classificar a corrosividade dos solos, para além de deverem ser considerados critérios específicos que de acordo com EN12501-2 [11] influenciam a corrosão de estruturas enterradas.

Quadro 1. Categorias de corrosividade atmosférica, respectivas velocidades de corrosão para o aço não ligado durante o primeiro ano de exposição e exemplos de ambientes típicos (adaptado de ISO 9223 [10] e EN ISO 12944-2 [13])

Categoria	Corrosividade	Velocidade de corrosão		Exemplos de ambientes típicos num clima temperado (exterior)
		g/(m ² ano)	g/ano	
C1	Muito baixa	≤ 10	≤ 1,3	-
C2	Baixa	> 10 a 200	> 1,3 a 25	Atmosferas com um nível de corrosão baixo. Maioritariamente áreas rurais.
C3	Média	> 200 a 400	> 25 a 50	Atmosferas urbanas e industriais com poluição por SO ₂ moderada. Áreas costeiras com salinidade baixa.
C4	Elevada	> 400 a 650	> 50 a 80	Áreas industriais e costeiras com salinidade moderada.
C5-I	Muito elevada	> 650 a 1500	> 80 a 200	Áreas industriais com humidade elevada e atmosfera agressiva.
C5-M				Áreas costeiras e marítimas com elevada salinidade.

Para estruturas imersas ou enterradas dada a diversidade de factores é difícil definir e normalizar as categorias de corrosividade, porém com um objectivo concreto é possível agrupar estes ambientes, por categorias tais como as definidas na norma NP EN ISO 12944-2 [13], que podem ser utilizadas na escolha dum sistema de protecção para estruturas metálicas em água e no solo (Im1 - água, Im2 – água do mar, Im3 - solos).

Em ambientes naturais aquosos, os organismos biológicos, que tendem a fixar-se e crescer nas superfícies dos materiais estruturais, promovem alterações ambientais locais que influenciam a corrosão. As consequências da acção microbiológica no desenvolvimento da corrosão são especialmente evidentes nas estruturas de aço em ambientes marítimos nas

proximidades do nível médio de maré baixa (Fig. 8) cujas condições favorecem o desenvolvimento duma colónia simbiótica de bactérias redutoras de sulfatos (SRB) e bactérias oxidantes de sulfuretos (SOB).

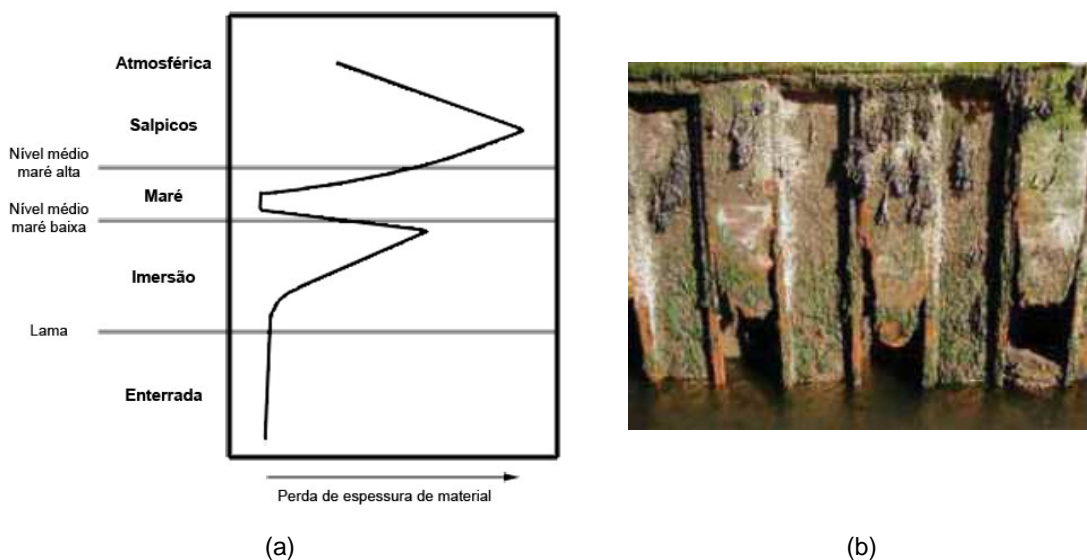


Figura 8. (a) Zonas de exposição dum elemento metálico na água do mar e perda de espessura relativa. (b) Corrosão agravada por acção microbológica.

3.3 Processos físicos - Fissuração do aço por fadiga

Os processos de deterioração podem ser resultantes do impacto de veículos, de sobrecargas e deformações acidentais decorrentes de assentamentos e escavações e ainda de acções sísmicas ou do fogo que em geral não podem ser previstos, mas os defeitos/danos induzidos são facilmente detectados e as soluções de correcção podem ser implementadas utilizando métodos de reparação ou reforço adequados a cada tipo de dano. Para além destes processos acidentais, a fissuração resultante de processos de fadiga é um dos principais mecanismos físicos de deterioração em pontes metálicas.

Os processos resultantes de fenómenos de fadiga, que se traduz na fissuração do aço em consequência de acções cíclicas continuadas, ocorrem geralmente em zonas críticas onde se podem verificar concentrações de tensões mais acentuadas.

A intensidade da concentração de tensões em estruturas é muito condicionada pela geometria e pormenorização do desenho e pelo processo de fabricação. Nas estruturas com ligações rebitadas e especialmente com parafusos correntes ou de alta resistência a concentração de tensões e as tensões residuais criadas no processo da execução das ligações constituem também factores críticos nos processos de fadiga. Por exemplo, em pontes antigas rebitadas, podem ocorrer ao longo do tempo fissuras de fadiga a partir de microfissuras existentes em torno dos orifícios dos rebites e resultantes do processo de rebitagem ou iniciadas pelo desenvolvimento de corrosão; podem também aparecer fissuras na cabeça dos rebites decorrentes do processo de fabrico mas em geral não apresentam perigosidade.

As zonas soldadas constituem, em geral, zonas críticas devido à possibilidade de existirem efeitos sinérgicos de concentração de tensões, tensões residuais e defeitos e heterogeneidades induzidas na microestrutura pela execução da soldadura. Nestas zonas podem desenvolver-se fissuras de fadiga de vários tipos, sendo que as fissuras iniciadas a partir da raiz da soldadura são normalmente mais difíceis de detectar pelo que além da inspeção visual requerem a utilização de técnicas de inspeção não destrutivas, Fig 9. A propagação das fissuras de fadiga pode apresentar um crescimento contínuo ao longo da soldadura, desenvolver-se apenas nos elementos secundários ou redundantes ou propagar-se aos elementos principais, terminando em zonas onde a concentração de tensões é mais baixa. A propagação de fissuras nos elementos primários apresenta maior perigosidade pois, dependendo da intensidade das cargas actuantes devidas aos veículos circulantes e se não forem detectadas atempadamente, podem conduzir ao colapso da estrutura. No entanto, se uma fissura de fadiga é detectada e as causas foram identificadas atempadamente, em geral podem ser tomadas medidas correctivas para mitigação e reparação dos danos no elemento fissurado.

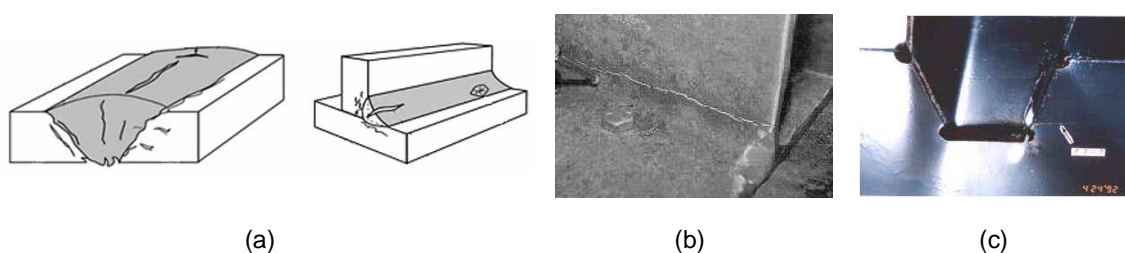


Figura 9. Fissuras induzidas por processos de fadiga: (a) vários tipos de fissuras nas soldaduras; (b) fissura no bordo da soldadura; (c) fissura iniciada num pormenor de desenho.

A fissuração por processos de fadiga pode também iniciar-se preferencialmente em zonas dos elementos onde a geometria determina a concentração de tensões especialmente se simultaneamente ocorrer redução de espessura por corrosão.

Dependendo dos objectivos duma inspeção podem também ser feitas estimativas do comportamento à fadiga dos materiais existentes na estrutura, efectuando ensaios em amostras retiradas de zonas seleccionadas de determinados elementos para obtenção das curvas S/N.

Se forem identificadas na estrutura potenciais zonas críticas em termos de fadiga, o comportamento à fadiga pode ser melhorado pela aplicação de medidas de reforço adequadas. Para além do reforço e reparação, outras medidas podem ser tomadas nos elementos afectados por fenómenos de fadiga, como seja, a intensificação da monitorização do processo de propagação, a redução das cargas actuantes e, em casos extremos não reparáveis, a colocação da estrutura fora de serviço.

Na pormenorização do projecto e na execução de estruturas novas ou na reparação das existentes, deve-se dar particular atenção a todos os pormenores que possam constituir

pontos críticos de iniciação dos processos de fadiga, nomeadamente os que se prendem com efeitos de entalhe ou chanfros, o acabamento das soldaduras e o controlo de qualidade da sua execução, a concepção dos reforços e a execução das ligações roscadas de modo a não criar tensões residuais assinaláveis

4 INSPECÇÃO E TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO

A existência de planos de manutenção nas pontes metálicas constitui um elemento chave na garantia destas estruturas continuarem a alcançar tempos de vida longos, superiores a 100 anos, como está demonstrado pelo património de pontes metálicas antigas existente. Os planos de manutenção na generalidade devem compreender a existência de **inspecções de rotina** anuais, que se baseiam numa observação visual e durante as quais podem ser efectuadas operações simples de manutenção e limpeza; **inspecções principais** com uma periodicidade de preferência de 3 anos que têm igualmente por base a observação visual mas em que os elementos estruturais são observados na sua totalidade incluindo o controlo por métodos expeditos como seja a batida do martelo, a verificação dos defeitos de pintura e dos danos por corrosão com medição da espessura por métodos directos ou técnicas de ultra-sons e a identificação visual ou por métodos não destrutivos simples de fissuras e de zonas críticas do ponto de vista da fadiga, seguindo procedimentos específicos, de acordo com o tipo de construção metálica: aparafusada, rebitada ou soldada; **inspecções especiais** sempre que seja detectado algum defeito relevante, dano físico accidental, corrosão avançada ou fissuração, ou se forem identificados pormenores passíveis de prejudicar o comportamento à fadiga da estrutura, que requeiram uma análise da evolução do defeito com monitorização e aplicação de métodos NDT ou uma avaliação mais profunda das características químicas e mecânicas do material estrutural. As inspecções especiais realizadas de forma programada e o diagnóstico delas resultante deve ser a base da tomada de decisão da execução de reparações gerais ou da reabilitação duma estrutura.

É importante distinguir os defeitos de fabrico do material ou de execução, nomeadamente os da pintura, que são de origem e que podem permanecer inofensivos durante a vida útil da estrutura, dos defeitos originados pelos mecanismos de degradação que são susceptíveis de propagação e levar a estrutura à redução ou mesmo à perda da sua funcionalidade. Muitos dos defeitos/danos resultantes dos processos de degradação das estruturas metálicas são facilmente identificáveis pela simples observação visual, o que constitui uma vantagem face a outro tipo de materiais estruturais. Uma característica que pode servir de identificação das fissuras de fadiga é o facto de se manterem activas, sob a acção das cargas cíclicas, nomeadamente na passagem dos veículos pesados. A manifestação deste tipo de fissuras em elementos principais, i.e. vigas principais ou transversais, requer uma inspecção muito pormenorizada com vista a identificar o risco de reincidência deste processo, tendo em conta a relevância destes elementos na segurança da estrutura. A detecção de perdas de espessura devido a corrosão na superfície dos elementos ou entre chapas é igualmente um defeito a quantificar porque não só reduz a resistência da estrutura como pode conduzir à destruição das ligações rebitadas ou aparafusadas e ainda criar novas zonas críticas para iniciação de processos de fissuração progressiva.

O Quadro 2 resume os diferentes tipos de métodos NDT mais utilizados na inspecção dos defeitos em estruturas metálicas.

Quadro 2. 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> .
Líquidos penetrantes	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.
Ultrasons	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 (excluindo 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.

Por vezes, quando se pretende conhecer as características da liga metálica e das suas propriedades mecânicas e de soldabilidade ou avaliar a compatibilidade de sistemas de pintura com as pinturas existentes, é necessário proceder também a exames de carácter destrutivo para os quais é necessário extrair amostras. Esta operação tem que ser feita sempre sob a orientação do engenheiro de estruturas para que não sejam induzidos danos no material que ponham em risco a segurança estrutural e deve ter em conta, sobretudo em estruturas antigas, a possível diversidade dos materiais existentes.

A avaliação do estado do sistema de protecção, nomeadamente do revestimento metálico ou por pintura, é igualmente importante para avaliar o tipo de intervenção de que o mesmo deve ser objecto, substituição por um revestimento novo ou reparação localizada e apenas renovação geral do esquema de pintura existente.

Convém salientar que existem defeitos de pintura decorrentes da fase de aplicação e que desde que não atinjam a base muitas vezes não são relevantes do ponto de vista da

durabilidade, nem têm carácter evolutivo. No entanto, há que os distinguir dos processos de degradação dos revestimentos por pintura que podem originar diferentes tipos de defeitos com carácter evolutivo, tais como, fissuração, empolamento, descamação, pulverulência, delaminação por perda de aderência e perda localizada do efeito barreira com desenvolvimento de corrosão da base e que correspondem a estados e causas distintas da degradação do sistema de protecção que devem ser avaliados. As diversas partes da norma NP EN ISO 4629 [20]-[28] indicam o modo de identificação, classificação e quantificação dos defeitos nos revestimentos por pintura. A Figura 10 mostra exemplos dos defeitos resultantes da degradação das pinturas.

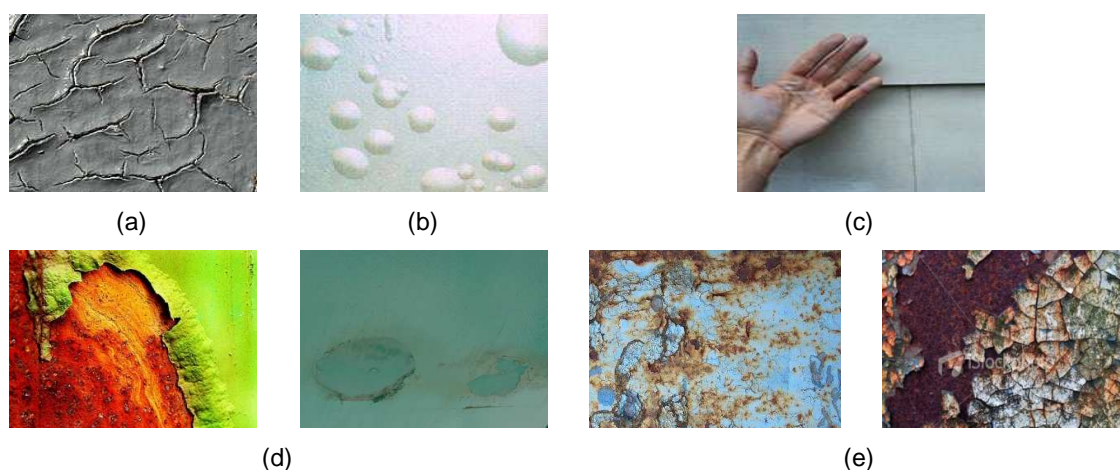


Figura 10. Ilustração de defeitos por degradação das pinturas: (a) fissuração; (b) empolamento; (c) pulverulência; (d) descamação; (e) corrosão.

5 REPARAÇÃO E CONSERVAÇÃO DOS ELEMENTOS EM AÇO

5.1 Métodos de reparação

A definição de especificações e procedimentos para a reparação duma estrutura metálica requer uma prévia identificação do elemento afectado, dos mecanismos e causas de deterioração bem como do conhecimento das condições de corrosividade do meio envolvente, das características do material e do conhecimento dos requisitos funcionais específicos do elemento que vai ser reparado. Só assim se poderá assegurar a compatibilidade da reparação com o material estrutural existente, a adequação do processo de reparação ao material estrutural e do sistema com os requisitos de durabilidade e o ambiente de exposição.

Os métodos mais correntemente utilizados na reparação dos elementos de estruturas em pontes metálicas incluem a execução de diversos procedimentos de tratamento dos danos no aço: esmerilhamento, martelagem, *stop hole*, soldadura, aparafusamento, rebitagem, adição de componentes, substituição parcial ou total de elementos, endireitamento (desempenamento) por calor e aplicação de reforço de elementos por sobreposição de chapas metálicas ou por aplicação de fibras de carbono (CFRP). Na reparação de uma

estrutura pode utilizar-se a combinação de mais do que um destes métodos na correcção dos danos originados por mecanismos de deterioração químicos ou físicos ou ainda por causas acidentais, Fig. 11.

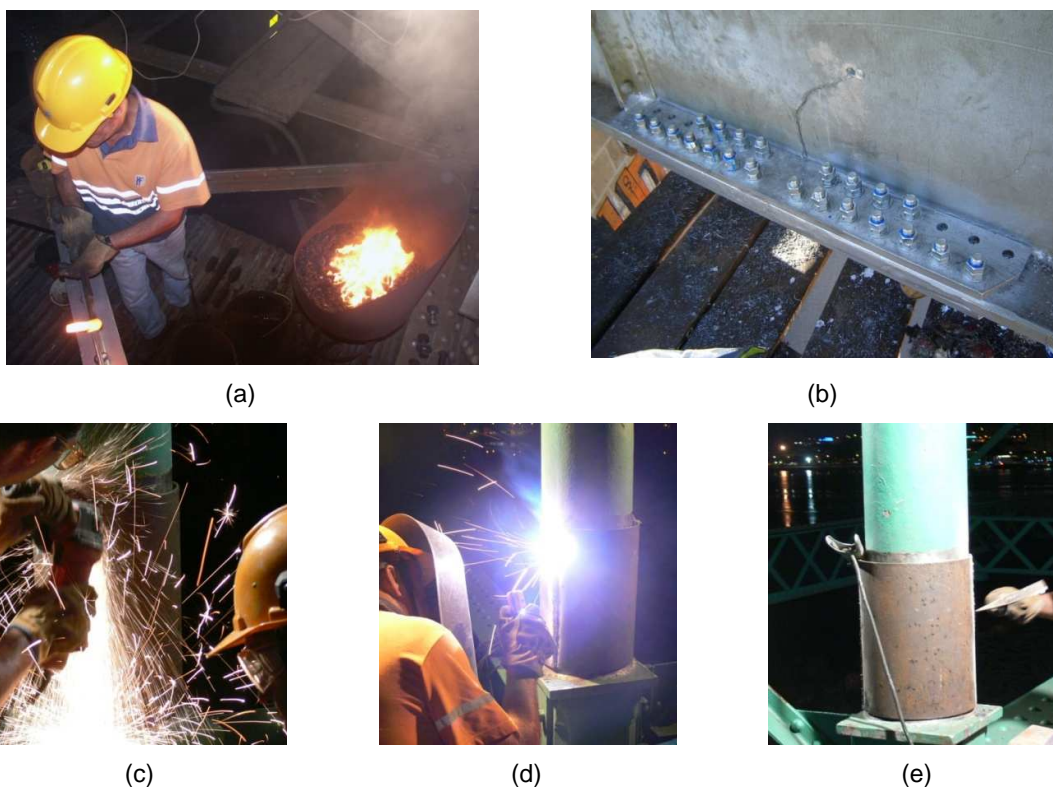


Figura 11. Métodos de reparação de danos em estruturas metálicas: (a) rebiteamento; (b) adição de placas, aparafusamento e stop hole; (c) esmerilhamento; (d) soldadura; (e) martelagem (cedidas por REFER).

O esmerilhamento, martelagem e a refusão por TIG são frequentemente usados para o melhoramento do comportamento à fadiga de áreas soldadas através do aperfeiçoamento da geometria, redução de tensões e/ou produção de compressão superficial.

O esmerilhamento, a execução de soldaduras e a limitação da progressão da fissura por furação na sua extremidade (*stop hole*) são procedimentos que podem ser aplicados na reparação de fissuras. Dependendo da gravidade da fissuração ou da sua extensão, em certos casos é necessária a adição de componentes ou, em circunstâncias de elevada severidade do processo de fissuração, mesmo a substituição parcial ou total do elemento.

Estas medidas de adição ou substituição de componentes requerem a execução de ligações dos novos componentes aos elementos existentes, com a utilização dos métodos de soldadura, rebiteamento, ou aparafusamento, dependendo a sua selecção das características do material a reparar pois, no caso de pontes históricas a natureza da liga pode impedir ou restringir a execução de soldaduras. Quando a soldadura não é aplicável, a utilização de fibras de carbono é também apresentada como alternativa para reparação de fissuras e para reforço.

O endireitamento (desempenamento) por calor é utilizado no caso de a deformação, normalmente provocada por causas acidentais de impactos ou de sobrecargas, atingir a zona plástica após ter sido excedido o limite de cedência do material.

5.2 Métodos de protecção contra a corrosão

A protecção contra a corrosão das estruturas metálicas é fortemente condicionada pelas medidas preventivas que se tomem no projecto, durante a execução e na exploração da estrutura.

No projecto e na execução as medidas preventivas prendem-se com a definição do material metálico mais adequado, a pormenorização do desenho de modo a afastar situações críticas na degradação do aço e a definição do sistema de protecção adequado a cada situação tendo em conta as condições de exposição, sendo desejável, especialmente em pontes, que o sistema tenha a maior durabilidade possível.

No que se refere à selecção do material metálico, boa resistência à corrosão sem necessidade de aplicação de sistemas de protecção adicionais constituem as principais opções na fase de projecto, que podem passar pela utilização dos aços patináveis, especialmente para estruturas em ambiente atmosférico rural ou urbano de baixa corrosividade, ou pela selecção de outras ligas mais resistentes à corrosão como é o caso respectivamente dos aços inoxidáveis ou do alumínio.

A tomada de medidas preventivas no projecto e na execução relativamente aos aspectos de pormenorização e geométricos, para minimizar a ocorrência de zonas críticas para a corrosão localizada, são também fundamentais para garantir a durabilidade do sistema de protecção. Deste modo na pormenorização no projecto deve atender-se que: as superfícies horizontais devem ter ligeira inclinação, deve existir o menor número de juntas e serem bem seladas, para evitar zonas de estagnação; deve garantir-se uma adequada drenagem e ventilação dos espaços fechados, eliminação de zonas de acumulação de detritos, introdução de sistemas que limitem o entupimento de caleiras, evitar a associação de materiais metálicos diferentes ou quando isso não for possível deve interpor-se isolamento entre os metais, e ter em atenção que, nomeadamente em ligações, se não for possível utilizar o mesmo metal o elemento de menor dimensão deve corresponder ao material mais nobre; os orifícios devem ser de contornos arredondados, evitando-se assim a existência de arestas vivas não só porque dificultam a aplicação do sistema de protecção de forma adequada mas também porque podem ser locais críticos para o início de fissuras de fadiga. O projecto deve prever um posicionamento adequado dos elementos que permita a manutenção da estrutura e a aplicação dos sistemas de protecção em condições adequadas. Na execução da estrutura, para além de se respeitar a pormenorização indicada no projecto, deve ser dado um tratamento de superfície adequado às soldaduras, para melhoramento do comportamento à fadiga e também do ponto de vista de durabilidade do metal e do sistema de protecção.

Na exploração e utilização a prevenção diz fundamentalmente respeito à existência de manutenção periódica eficaz, de modo a minimizar as acções de reparação futuras.

Os sistemas de protecção das estruturas metálicas contra a corrosão podem consistir na interposição de barreiras de diversos tipos entre o metal e o meio ambiente, tais como a aplicação de revestimentos orgânicos ou metálicos, ou de uma combinação destes dois tipos (revestimentos duplex), que são os sistemas mais frequentemente aplicados em estruturas aéreas; bandas betuminosas ou encamisamento com materiais plásticos, mais adequados em elementos enterrados no solo ou na água do mar. Podem ainda ser aplicados sistemas de protecção catódica com ou sem aplicação simultânea de revestimentos ou outras barreiras, especialmente em estruturas enterradas ou em água, particularmente na água do mar.

Normalmente, os sistemas de pintura são o método de protecção menos dispendioso, no entanto é preciso considerar os custos de manutenção que serão dependentes do tipo de sistema e das condições de agressividade da exposição.

Os sistemas de protecção por pintura são em geral compostos pelo menos por 3 camadas: a camada de primário que tem em geral adições para inibir a corrosão; a camada intermédia que confere a estrutura e é a principal responsável pelo efeito barreira do revestimento, que pode ser aplicada em uma ou mais demãos; e a camada de acabamento cuja função, para além dos efeitos estéticos, é constituir uma barreira à degradação dos sistema de protecção pela acção da radiação UV [29]. Naturalmente que um aspecto muito importante é a durabilidade e a compatibilidade entre as várias camadas.

A norma NP EN ISO 12944, que contém 8 partes [12]-[19], especifica os requisitos para os sistemas de pintura para protecção do aço contra a corrosão. Os sistemas de pintura devem ser especificados de acordo com as condições de exposição ambiental, a classe de corrosividade e a durabilidade pretendida, descritas, respectivamente, nas partes 1 [12] e 2 [13] desta norma.

As partes 5 e 4 [16] da norma NP EN ISO 12944 fornecem, respectivamente, orientação para a selecção dos sistemas de pintura e para a preparação de superfície da base. As partes 3, 6 e 7 [14][17][18] da norma dão indicações sobre a avaliação laboratorial, concepção, execução e supervisão em obra.

A elaboração do caderno de encargos contendo os requisitos do sistema de pintura deve seguir a orientação dada na parte 8 desta norma [19]. Requisitos de aspecto e relativos à protecção ambiental, saúde e segurança também devem ser considerados no caderno de encargos, cumprindo com toda a regulamentação em vigor.

Na reparação de uma estrutura metálica já protegida com revestimentos, no que se refere à reparação da protecção, há que tomar a decisão entre substituição completa ou parcial com renovação do sistema de protecção existente, tendo em conta a prévia avaliação do seu estado. No caso de a opção ser a substituição completa, a especificação do sistema deve seguir regras idênticas às adoptadas numa estrutura a proteger pela primeira vez. No caso de se optar apenas pela reposição localizada e renovação das camadas intermédia e de acabamento é necessário efectuar ensaios para assegurar a compatibilidade do novo sistema de pintura com o revestimento existente.

A eficácia dum sistema de pintura na protecção do metal pode ser condicionado fortemente pelas condições de preparação da base e pela aplicação, pelo que no caderno de encargos do sistema de pintura devem ser especificadas todas as condições dos requisitos de preparação da base metálica, condições de aplicação em obra e respectivo sistema de controlo de qualidade da preparação da base e da aplicação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pontes metálicas já demonstraram que podem apresentar uma boa durabilidade, que lhes permitiu alcançar tempos de vida útil largamente superiores a 100 anos, desde que sejam objecto de manutenção periódica, e que na sua conservação e reparação sejam tomadas as opções adequadas e de forma atempada.

Na construção metálica, o material estrutural está à vista, pelo que muitos dos danos são observáveis por inspecção visual e, além disso, os métodos de inspecção não destrutivos já atingiram um estado de desenvolvimento muito avançado, por impulso da indústria metalomecânica, o que torna mais fácil o diagnóstico das condições destas estruturas e a tomada atempada das acções correctas para a sua conservação.

Durante mais de 100 anos as tintas à base de chumbo garantiram a durabilidade do aço nas pontes metálicas. Há mais de duas décadas que estas tintas deixaram de ser permitidas e foram sendo substituídas por outros sistemas, embora na sua maioria apresentem menores características de capacidade protectora/custo. Mais recentemente as limitações ao nível dos VOC's vieram introduzir restrições na aplicação de alguns sistemas de pintura. Espera-se que nos sistemas de protecção por pintura, particularmente com as inovações ao nível dos nanomateriais, possam ser desenvolvidos novos sistemas que permitam dar uma melhor resposta às exigências ecológicas e de saúde pública, ter menores exigências de preparação da superfície metálica e que possam, apenas numa simples aplicação em mono camada, satisfazer os requisitos de durabilidade que são requeridos para a protecção das pontes metálicas.

A par das propriedades de resistência, resiliência e ductilidade, e do bom desempenho do ponto de vista da durabilidade nas pontes metálicas, os aços estruturais incorporam como constituinte principal o ferro, que é um dos elementos que existe em maior quantidade na crosta terrestre, e são materiais integralmente recicláveis, pelo que satisfazem também exigências de sustentabilidade da construção. Os últimos desenvolvimentos nos aços de elevado desempenho que, a par da melhoria nas características mecânicas e de soldabilidade, apresentam também bom comportamento à corrosão atmosférica, sem necessidade de sistemas de protecção adicionais, transformaram estes aços numa alternativa interessante para a construção de pontes, face aos condicionalismos nos sistemas por pintura.

Agradecimentos: Esta comunicação 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-financiamento pelo FEDER.

7 REFERÊNCIAS

- [1] EN 10025-1:2004 - *Hot rolled products of structural steels. Part 1: General technical delivery conditions.*
- [2] EN 10025-2:2004/AC:2005 - *Hot rolled products of structural steels. Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels.*
- [3] EN 10025-3:2004 - *Hot rolled products of structural steels. Part 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels.*
- [4] EN 10025-4:2004 - *Hot rolled products of structural steels. Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels.*
- [5] EN 10025-5:2004 - *Hot rolled products of structural steels. Part 5: Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance.*
- [6] EN 10025-6:2004+A1:2009 - *Hot rolled products of structural steels. Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition.*
- [7] *Réparation et rénovation des structures métalliques.* Ed. STRESS; December 2008.
- [8] B. Kühn, M. Lukić, et al - *Assessment of existing steel structures. Recommendations for estimation of remaining fatigue life.* JRC – ECCS cooperation agreement for the evolution of Eurocode 3. EUR 23252 EN, 2008.
- [9] Eric S. Kline - *Bridges for service life beyond 100 years: Corrosion protection for 100 years.* KTA-TATOR, INC. www.kta.com.
- [10] ISO 9223:1992 – *Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres – classification.*
- [11] EN 12501-2:2003 - *Protection of metallic materials against corrosion. Corrosion likelihood in soil. Part 2: Low alloyed and non alloyed ferrous materials.*
- [12] NP EN ISO 12944-1:1999 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 1: Introdução geral (ISO 12944-1:1998).*
- [13] NP EN ISO 12944-2:1999 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 2: Classificação de ambientes (ISO 12944-2:1998).*
- [14] NP EN ISO 12944-3:1999 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 3: Concepção e disposições construtivas (ISO 12944-3:1998).*
- [15] NP EN ISO 12944-4:1999 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 4: Tipos de superfície e de preparação de superfície (ISO 12944-4:1998).*
- [16] EN ISO 12944-5:2007 (Ed.2) - *Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Parte 5: Protective paint systems (ISO 12944-5:2007).*
- [17] NP EN ISO 12944-6:1999 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 6: Ensaio de desempenho em laboratório (ISO 12944-6:1998).*
- [18] NP EN ISO 12944-7:2000 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 7: Execução e supervisão dos trabalhos de pintura (ISO 12944-7:1998).*
- [19] NP EN ISO 12944-8:2001 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura. Parte 8: Desenvolvimento de especificações para obras novas e manutenção (ISO 12944-8:1998).*

- [20] NP EN ISO 4628-1:2005 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 1: Introdução geral e sistema de designação* (ISO 4628-1:2003).
- [21] NP EN ISO 4628-2:2005 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 2: Avaliação do grau de empolamento* (ISO 4628-2:2003).
- [22] NP EN ISO 4628-3:2005 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 3: Avaliação do grau de enferrujamento* (ISO 4628-3:2003).
- [23] NP EN ISO 4628-4:2005 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 4: Avaliação do grau de fissuração* (ISO 4628-4:2003).
- [24] NP EN ISO 4628-5:2005 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 5: Avaliação do grau de descamação* (ISO 4628-5:2003).
- [25] NP EN ISO 4628-6:2007 (Ed.2) - *Paints and varnishes. Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance. Parte 6: Assessment of degree of chalking by tape method* (ISO 4628-6:2007).
- [26] NP EN ISO 4628-7:2005 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade 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).
- [27] NP EN ISO 4628-8:2007 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade 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).
- [28] NP EN ISO 4628-10:2005 (Ed.1) - *Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade de defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto. Parte 10: Avaliação do grau de corrosão filiforme* (ISO 4628-10:2003).
- [29] D.A. Bayliss, D.H. Deacon - *Steelwork Corrosion Control*. 2ª Edição. Spoon Press. London, 2002.