

DM

**Tratamentos de Prevenção
e Proteção Anticorrosivas
para Estruturas Metálicas**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

António Sérgio Pereira Pestana

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

junho | 2018

Tratamentos de Prevenção e Proteção Anticorrosivas para Estruturas Metálicas

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

António Sérgio Pereira Pestana

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR

José Manuel Martins Neto dos Santos



TRATAMENTOS DE PREVENÇÃO E PROTEÇÃO ANTICORROSIVAS PARA ESTRUTURAS METÁLICAS

Tese submetida para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil na
Universidade da Madeira

Por:

António Sérgio Pereira Pestana

Orientador:

José Manuel Martins Neto dos Santos
(Universidade da Madeira)

Junho de 2018

TRATAMENTOS DE PREVENÇÃO E PROTEÇÃO ANTICORROSIVAS PARA ESTRUTURAS METÁLICAS

PALAVRAS-CHAVE:

Corrosão
Estrutura Metálica
Película
Proteção
Revestimento
Tratamento

KEYWORDS:

Corrosion
Metallic Structure
Film
Protection
Coating
Procedure

Autor: António Sérgio Pereira Pestana
FCEE – Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia
Campus Universitário da Penteada
9020 - 105 Funchal – Portugal, s/n
Telefone + 351 291 705 230
Correio eletrónico: secretariadointerno@uma.pt
Funchal, Madeira

RESUMO:

A corrosão das estruturas metálicas tem acarretado elevados custos de prevenção, reparação e substituição, sendo que este é um dos problemas mais relevantes no ramo da construção civil. Esta dissertação pretende contribuir para o aumento conhecimento na Região Autónoma da Madeira (RAM) do fenómeno da corrosão e das técnicas de prevenção e proteção anticorrosivas.

Numa fase inicial é introduzido o tema “metais” onde são apresentadas as suas principais características, os elementos de carácter metálico presentes na tabela periódica e como as suas propriedades atómicas influenciam o seu comportamento e os tipos de estrutura atómica que constituem os metais e a sua classificação.

Posteriormente é descrito o problema da corrosão com a apresentação dos vários mecanismos da corrosão. São também apresentadas algumas formas de previsão da taxa de corrosão, os fenómenos em que o produto da corrosão tem propriedades benéficas através da passivação, e apontados os tipos de corrosão mais comuns e a sua forma de apresentação. São ainda indicados os fatores de maior relevância que influenciam a corrosão.

Continuamente, é desenvolvido o tema principal desta dissertação, os métodos possíveis de prevenção e proteção das estruturas metálicas desde os mais primários que se iniciam na metalurgia até os processos mais elaborados através de corrente elétrica, passando também pelos diversos tipos de revestimentos possíveis para os metais. São também assinalados alguns dos problemas inerentes aos métodos e algumas formas de minimização.

Finalmente, é analisado um caso prático, onde foi aplicado um dos tipos de proteção existentes e medida a degradação deste tipo de revestimento ao longo do tempo através de alguns ensaios presentes nas normas EN NP ISO. Além disso, foram comparadas diversos cenários de manutenção para a estrutura em questão de modo a encontrar a solução mais viável em termos económicos, em termos de durabilidade, do desgaste em geral da estrutura, e apresentação visual.

Os resultados permitiram concluir que entre os diversos cenários apresentados, a importância do estado do substrato metálico antes da aplicação do revestimento em relação a outros fatores como a espessura a aplicar, é fulcral num sistema anticorrosivo, a longo prazo.

ABSTRACT:

The corrosion in metal structures represents high costs in prevention, reparation and replacing, therefore this represents one of the most relevant problems in civil construction. This dissertation intends to contribute for greater understanding in the Autonomous Region of Madeira (ARM) regarding the phenomenon of corrosion and the anticorrosive techniques for prevention and protection.

In an initial stage, the topic "metals" is introduced and presented its main characteristics, also the metallic elements in the periodic table, including their atomic properties which influence their behavior, and the types of atomic structures that form the metals followed by their classification.

Afterwards, brings the description of the problem of corrosion introducing the various corrosion mechanisms. Then are showed some forms to estimate the rate of corrosion, the phenomenon which the product of corrosion has positive consequences by passivation, and the most common types of corrosion and its way of emergence. Still there are indicated the most relevance factors that influence corrosion.

Continuously it is developed the main topic of this dissertation where arises the possible methods of prevention and protection of metallic structures, starting with the most basic in metallurgy to the most elaborate through electric current, followed by the various types of coatings possible to metals. It's also highlighted some of the problems regarding these methods and some ways to minimize its effects.

Finally, a case study was analyzed where one of the methods of protection was applied and the degradation in this coating was measured through time using some simple tests presented by EN NP ISO Standards. Besides this, several alternatives and solutions for conservation of the case study metal structure were compared in order to find the most viable solution in terms of economic, durability, appearance, abrasion and wear of the structure.

The results allowed to conclude that between various scenarios presented, the importance of metallic substrate cleansing before the introduction of the prevention method, like other important factors as film thickness, considered key in noncorrosive systems, on a long term.

AGRADECIMENTOS:

Primeiramente queria agradecer ao meu orientador, Professor José Santos, por ter-me ajudado neste trabalho.

Aproveito a oportunidade para agradecer à minha família em especial à minha esposa Idalina Pestana, à minha filha Matilde Pestana, aos meus pais, aos docentes da UMa e aos meus colegas que me acompanharam neste percurso académico, em particular ao Abel Gouveia e ao Jonas Vieira.

Aproveito também para agradecer à Nova Citacor, Metalização e Pinturas Lda, pelos dados fornecidos em especial ao Sr. Emanuel Freitas, Sr. Ricardo Abreu e ao Srs. Engenheiros Carlos Canhão e Vítor Mouco, à Secretaria Regional do Equipamento Social e Transportes e à Direção Regional de Estradas.

Funchal, Junho de 2018

Sérgio Pestana

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Motivação e objetivos	3
1.3 - Estrutura da dissertação.....	4
2. METAIS	5
2.1 - Evolução histórica dos metais	5
2.2 - Características e constituição dos Metais	6
2.2.1 - Elementos químicos de carácter metálico	6
2.2.2 - Classificação dos metais	8
2.2.3 - Estrutura cristalina dos metais.....	8
3. CORROSÃO NOS METAIS	13
3.1 - Mecanismos de corrosão	14
3.1.1 - Corrosão eletroquímica ou húmida.....	14
3.1.2 - Corrosão química ou seca	20
3.1.3 - Taxa de corrosão	22
3.1.4 - Passivação.....	22
3.1.5 - Tipos de corrosão	24
3.2 - Fatores de influência na corrosão	37
3.2.1 - Corrosão atmosférica	37
3.2.2 - Corrosão em água	41
3.2.3 - Corrosão em solos.....	43
3.2.4 - Corrosão biológica	45
3.2.5 - Corrosão química.....	45
3.2.6 - Solubilidade dos produtos de corrosão	46
4. PREVENÇÃO E PROTEÇÃO PARA METAIS.....	47
4.1 - Inibidores de corrosão	47
4.1.1 - Tipos de inibidores.....	47
4.2 - Proteções catódicas	49
4.2.1 - Proteções catódicas em ambientes aquosos	49
4.2.2 - Proteções catódicas em solos	51
4.2.3 - Proteções catódicas em betão armado	52
4.3 - Proteções anódicas	56
4.3.1 - Proteções catódicas vs anódicas	58
4.4 - Revestimentos	59
4.4.1 - Revestimentos orgânicos	59
4.4.2 - Revestimentos inorgânicos.....	61
4.4.3 - Revestimentos metálicos	63
4.4.4 - Problemas que comprometem os revestimentos	69
4.4.5 - Controlo e inspeção dos revestimentos	70
4.4.6 - Preparação das superfícies metálicas.....	72
4.4.7 - Avaliação da degradação na estrutura	73

5. CASO PRÁTICO.....	75
5.1 - Ponte de S. Vicente	75
5.2 - Estado geral e tratamento da estrutura metálica 2010.....	77
5.3 - Medição espessura do revestimento (2010)	77
5.4 - Estado atual da Ponte S. Vicente (2017).....	78
5.4.1- Grau de degradação no período atual (2017)	79
5.5 - Análise de cenários de intervenção local para Ponte S. Vicente	82
5.5.1 - Estimativa do grau de enferrujamento em função do tempo	82
5.5.2 - Estimativa dos custos através do sistema de pontos para intervenções locais	84
5.5.3 - Apresentação do Cenário A	86
5.5.4 - Apresentação do Cenário B	87
5.5.5 - Apresentação do Cenário C.....	87
5.5.6 - Estimativa da perda de película ao longo do tempo.....	88
5.6 - Análise de cenários de intervenção total para Ponte S. Vicente.....	89
5.6.1 - Estimativa dos custos através do sistema de pontos para intervenções totais.....	89
5.6.2 - Apresentação do Cenário D.....	91
5.6.3 - Apresentação do Cenário E	92
5.6.4 - Apresentação do Cenário F	92
5.7 - Comparação dos diferentes cenários através do sistema de pontos.....	93
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	97
6.1 - Conclusões	97
6.2 - Desenvolvimentos futuros	98
BIBLIOGRAFIA	99
ANEXOS.....	101
Anexo 1	101
Anexo 2	104
Anexo 3	108
Anexo 4	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Peça de Bronze da era romana [1].....	1
Figura 2 - Ponte de <i>Golden Gate</i> (esquerda), corrosão em zonas rebitadas (direita) [3].....	2
Figura 3 - Ponte 25 e Abril [4]	2
Figura 4 - Estaleiro Naval do Caniçal antes do colapso da plataforma (esquerda), depois do colapso (direita) [5]	3
Figura 5 - Composição da crosta terrestre (%) (Adaptado de [7])	6
Figura 6 - Tabela periódica (Adaptado de [9])	7
Figura 7 - Estrutura cristalino vs amorfo [8]	9
Figura 8 - Estruturas cristalinas de arranjo atômico CCC e CFC dos metais [8].....	9
Figura 9 - Proporção e morfologia da fase [8].....	9
Figura 10 - Relação entre nucleação e crescimento N&G [10].....	10
Figura 11 - Diagrama das fases do aço e ferro com variação do carbono [10].....	11
Figura 12 - Ciclo do minério (Adaptado de [11])	13
Figura 13 - Circuito de uma pilha	14
Figura 14 - Elétrodo [12].....	15
Figura 15 - Domínio de estabilidade da água [12]	18
Figura 16 - Diagrama de equilíbrio para sistema Fe/H ₂ O [12]	19
Figura 17 - Potencial/taxa de corrosão [12]	20
Figura 18 - Oxidação [13].....	20
Figura 19 - Esquema de oxidação [11]	21
Figura 20 - Passivação [13].....	23
Figura 21 - Película não contínua (esquerda) e com bolha (direita) [13].....	23
Figura 22 - Potencial crítico/Taxa de corrosão [12]	23
Figura 23 - Tipos de corrosão [14]	24
Figura 24 - Corrosão uniforme	25
Figura 25 - Picadas ou <i>pitting</i> [11].....	25
Figura 26 - Processo no interior da picada [11]	26
Figura 27 - Corrosão em frestas [11]	27
Figura 28 - Corrosão galvânica	28
Figura 29 - Corrosão por erosão de um tubo [11].....	29
Figura 30 - Corrosão por erosão em função da velocidade de um líquido [14].....	30
Figura 31 - Cavitação [11]	30
Figura 32 - Corrosão por atrito [11].....	31
Figura 33 - Aço inoxidável sensibilizado tipo 304 [11].....	32
Figura 34 - <i>Weld decay</i> [14]	33
Figura 35 - Estrutura tipicamente sujeita a cloretos (esquerda), corrosão sob tensão (direita) [15]	35
Figura 36 - Empolamento hidrogénio [11].....	36
Figura 37 - Fratura por corrosão sob tensão/fragilização por hidrogénio [11].....	37
Figura 38 - Categorias de corrosividade em Portugal continental (Adaptado de [15])	39
Figura 39 - Esquema de corrosão atmosférica no ferro [14]	40
Figura 40 - Relação entre ponto de orvalho/humidade relativa [14]	40
Figura 41 - Corrosão em aço em várias soluções de NaCl [14]	41
Figura 42 - Perfil de corrosão de aço em água do mar [14]	42
Figura 43 - Provete aço sujeito a incrustações	42
Figura 44 - Parâmetros de solo que afetam a corrosão [14]	44
Figura 45 - Aço galvanizado enterrado em zona industrial.....	44
Figura 46 - Distribuição Lognormal da taxa de corrosão com e sem inibidores [14].....	48
Figura 47 - Embarcação (esquerda) Ânodo sacrifício corroído vs novo (direita)	49
Figura 48 - Esquema de corrente impressa [14].....	50
Figura 49 - Sistema corrente impressa em superpetroleiro [14].....	50
Figura 50 - Circuito em solo [14]	51

Figura 51 - Ânodo sacrifício (esquerda) vs corrente impressa (direita) [14]	52
Figura 52 - Fendilhação (esquerda), delaminação (direita) [17]	52
Figura 53 - Aspersão térmica (esquerda), cilindros (direita) [17]	53
Figura 54 - Processo de realcalinização [17]	55
Figura 55 - Reacalinação vs proteção catódica [17].....	55
Figura 56 - Esquema de dessalinização [19]	56
Figura 57 - Dessalinização vs proteção catódica [17].....	56
Figura 58 - Diagrama de polarização em regiões ativas, passivas e transpassivas [14]	57
Figura 59 - Proteção anódica em tanque de ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) [11].....	58
Figura 60 - Exemplo de esquema de pintura [22]	59
Figura 61 - Fragmentação de Argamassa hidráulica [14]	61
Figura 62 - Fases para anodização de peça alumínio [14]	62
Figura 63 - Evolução da película óxida hidratada em função do tempo a 85°C [14]	62
Figura 64 - Fosfatização (esquerda), cromatização (direita) de peças [24].....	63
Figura 65 - Consequência do par galvânico, eletrólito (A), camada catódica (B), metal (C) [14]	63
Figura 66 - Peças cromadas [24]	64
Figura 67 - Durabilidade de elementos galvanizados [26]	65
Figura 68 - Galvanização (esquerda) Sherardização (direita) [22]	66
Figura 69 - Maquinaria tocha de combustão (esquerda) e arco elétrico (direita) [27]	67
Figura 70 - Projeção por arco elétrico, maquinaria (esquerda e centro) rugosidade do revestimento (direita).....	68
Figura 71 - Critérios de boa concepção [16]	69
Figura 72 - Perfil substrato [14]	70
Figura 73 - Medidor de espessura de película seca (Elcometer).....	70
Figura 74 - Tipos de medidores, película húmida (esquerda), fluxo magnético (direita) [29]	71
Figura 75 - Medidor espessura húmida (esquerda), medidor de temperatura do metal (centro), dispositivos de medição para ponto orvalho e humidade relativa (direita)	71
Figura 76 - Teste de concentração de cloretos [31].....	71
Figura 77 - Padrões fotográficos do grau de oxidação [30]	72
Figura 78 - Padrões fotográficos de comparação para substratos com diversos graus de oxidação após limpeza [30].....	73
Figura 79 - Padrões fotográficos para avaliação o grau de enferrujamento [32].....	74
Figura 80 - Critério de avaliação dos defeitos (Adaptado de [32])	74
Figura 81 - A nova Ponte de São Vicente [33]	75
Figura 82 - Antiga Ponte de S. Vicente [34]	76
Figura 83 - Apresentação de corrosão na estrutura.....	76
Figura 84 - Grau de enferrujamento	80
Figura 85 - Representação das diferentes intervenções na estrutura	80
Figura 86 - Grau de pulverulência aos 2 anos	80
Figura 87 - Grau de Pulverulência aos 7 anos	81
Figura 88 - Estimativa da função para grau de pulverulência	81
Figura 89 - Estimativa do grau de enferrujamento após limpeza substrato grau Sa 2 ½	83
Figura 90 - Estimativa do grau de enferrujamento após limpeza substrato grau St3	84
Figura 91 - Estimativa da evolução do grau de enferrujamento para cenário A (2010/2060)	87
Figura 92 - Estimativa do grau de enferrujamento para Cenário B (2010/2060)	87
Figura 93 - Estimativa do grau de enferrujamento para Cenário C (2010/2060)	88
Figura 94 - Estimativa da evolução da espessura	89
Figura 95 - Estimativa do grau de enferrujamento para Cenário D (2010/2060).....	92
Figura 96 - Estimativa do grau de enferrujamento para cenário E (2010/2060)	92
Figura 97 - Estimativa do grau de enferrujamento para cenário F (2010/2060)	93
Figura 98 - Evolução da estimativa de custos ao longo do tempo.....	94
Figura 99 - Diferença final entre cenários	95

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Idade dos Metais (Adaptado de [2]).....	5
Tabela 2 - Influência da microestrutura nas propriedades dos metais (Adaptado de [10])	10
Tabela 3 - Efeito na resistência por adição de elementos (Adaptado de [11])	26
Tabela 4 - Série galvânica (Adaptado de [11]).....	28
Tabela 5 - Classificação dos ambientes corrosivos (Adaptado de [16])	38
Tabela 6 - Categorias de corrosividade para águas e solos [16].....	43
Tabela 7 - Princípios de proteção/reparação (Adaptado de [18])	54
Tabela 8 - Comparação anódicas/catódicas [11].....	58
Tabela 9 - Gama de durabilidade [16].....	60
Tabela 10 - Espessura média de revestimento em função da espessura da peça metálica [25]	65
Tabela 11 - Caracterização da estrutura (2010)	77
Tabela 12 - Esquema contemplado	77
Tabela 13 - Sistema de pintura	77
Tabela 14 - Medições EPS de 2010.....	78
Tabela 15 - Recomendações ISO 12944-5.....	78
Tabela 16 - Medições EPS para comparação 2017	79
Tabela 17 - Caracterização da estrutura 2017	82
Tabela 18 - Dados para estimativa do grau enferrujamento com grau Sa 2 ½	83
Tabela 19 - Dados para estimativa do grau enferrujamento com grau St3	83
Tabela 20 - Esquemas locais para manutenção.....	84
Tabela 21 - Estimativa de custo para Esquema 1	85
Tabela 22 - Estimativa de custo para Esquema 2	86
Tabela 23 - Estimativa de pontos/m de intervenções locais entre 2010/2060	88
Tabela 24 - Esquemas gerais para intervenção total.....	90
Tabela 25 - Estimativa de custo para Esquema 3	90
Tabela 26 - Estimativa de custo para Esquema 4	91
Tabela 27 - Estimativa de pontos/m para intervenções totais entre 2010/2060	93
Tabela 28 - Estimativa de pontos/m para todos os cenários entre 2010/2060.....	94

INTRODUÇÃO

1.1 - Enquadramento

Para a grande maioria das pessoas a corrosão significa ferrugem. A ferrugem é o nome dado especificamente à corrosão do ferro, enquanto a corrosão representa o fenómeno destrutivo que afeta todos os metais.

O ferro não foi o primeiro metal a ser usado pelos humanos mas é certamente o mais utilizado e provavelmente foi o primeiro a apresentar problemas de funcionalidade devido à sua degradação.

Ainda no tempo em que reinava o império romano, já surgiam as primeiras teorias sobre o fenómeno da corrosão nas superfícies metálicas, tal como algumas formas de minimizá-las. Algumas das formas de minimização da corrosão aparecem com o uso de óleos aplicados em peças de bronze (Figura 1) de forma a proteger o metal da degradação.



Figura 1 - Peça de Bronze da era romana [1]

Na revolução industrial americana, com a utilização em massa de materiais que continham ferro, foram observados comportamentos diferentes perante a corrosão para metais de diferente constituição ou de diferente processo de produção. Os metais formados a frio, ou aços resultantes da utilização de prensas e rolos tinham mais tendência para a corrosão relativamente àqueles que provinham da fundição, ou seja, formados a quente. Casos flagrantes surgiram em pontes metálicas (Figura 2) em que diferentes seções foram construídas com os diferentes processos metalúrgicos, onde, os aços formados a frio degradavam-se facilmente ao ponto de serem inutilizáveis num prazo de oito anos, enquanto os metais formados a quente mantinham uma funcionalidade plena. Esta situação demonstrou que o processo metalúrgico influenciava a tendência para a corrosão e que a interação entre aços de diferente qualidade despontava maior tendência para a corrosão dos aços que continham impurezas ou danos superficiais [2].

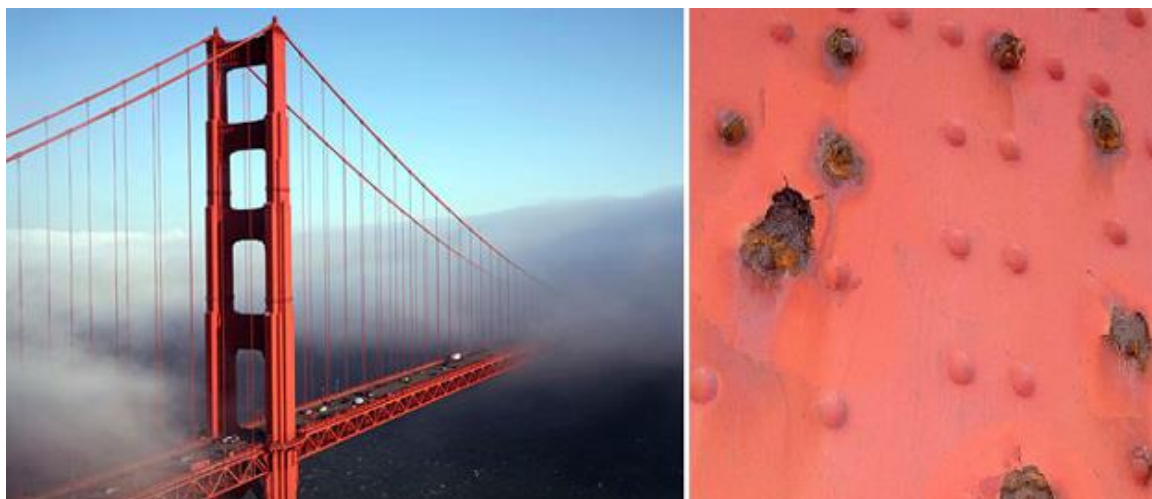


Figura 2 - Ponte de *Golden Gate* (esquerda), corrosão em zonas rebitadas (direita) [3]

É de conhecimento geral que a corrosão é um processo inevitável e que as estruturas metálicas devem ser protegidas de modo a prolongar a sua vida útil, tendo inevitáveis custos económicos.

Estas estruturas metálicas como a anteriormente apresentada na Figura 2, considerada pela Sociedade Americana de Engenheiros Civis como uma das sete maravilhas do mundo moderno, e designada pela UNESCO como Património Mundial da Humanidade, a Ponte de *Golden Gate* construída em 1937, é quase inteiramente constituída por aço que, sem exceção, é afetada pelo fenómeno da corrosão ao longo dos seus 2737 m de comprimento, 27 m largura e 227 m de altura máxima, onde diferentes áreas da ponte são alvo de intervenção para repintura em intervalos periódicos de 10 a 20 anos sendo aplicada a cor característica laranja, e facilmente levantam a questão dos custos elevadíssimos inerentes à manutenção deste tipo de estrutura ao longo do tempo [3].

A Ponte 25 de Abril (Figura 3), muito conhecida pelos portugueses construída em 1966 com o custo na altura de cerca de 11M€, que atravessa o rio Tejo surge como outro exemplo de custos elevadíssimos devido à corrosão pois, ainda este ano (2018), foi lançado um concurso público para trabalhos de manutenção, com o preço base de 18M€ que consistem em diversos trabalhos de intervenção na estrutura metálica, nomeadamente a reposição de soldaduras e reposição localizada da proteção anticorrosiva entre outros, ao longo de dois anos [4].

Em outros casos, por falta de manutenção, podem figurar situações de falhas onde a estrutura metálica não garante a sua funcionalidade, pondo em risco perdas de rendimento de equipamentos e ruturas repentinas que podem causar elevados danos materiais e pessoais.



Figura 3 - Ponte 25 e Abril [4]



Figura 4 - Estaleiro Naval do Caniçal antes do colapso da plataforma (esquerda), depois do colapso (direita) [5]

Assim, a corrosão apresenta elevados impactos económicos, sociais e ambientais. Estudos económicos avaliam a corrosão como tendo custos de cerca de 3 a 4% do PIB e que cerca de 50% surge da corrosão atmosférica. No caso de Portugal, este valor representa mais de 5.000M€, sendo um valor de proporções significativas que coloca a corrosão não só nas temáticas da durabilidade das estruturas e impacto ambiental, mas também na discussão económica e financeira. Outras estimativas indicam que cerca de 20 a 30% do custo total previsto pela corrosão pode ser evitado através da implementação de tecnologias e métodos de gestão e controlo da corrosão.

A prevenção da corrosão continua a ser a melhor metodologia, sendo que permite logo à partida, um aumento da durabilidade aliado a uma redução de custos de intervenção. Os tratamentos anticorrosivos são muito utilizados como métodos de prevenção e manutenção mas, estes também tendem a deteriorar-se e acabam por ceder à grande apetência a que os metais têm para a corrosão, principalmente quando os tratamentos não são efetuados da forma mais adequada e em tempo útil de modo a reduzir a perda das características que fazem do aço um material muito versátil no ramo da construção [6].

1.2 - Motivação e objetivos

A temática da corrosão e da sua prevenção abrange as áreas da engenharia civil, química e metalurgia, obrigando por isso, a uma formação abrangente dos técnicos envolvidos.

Sendo a RAM em particular um local onde a corrosão surge de forma muito fluida devido às condições atmosféricas, taxa de humidade, proximidade da zona costeira e outros, o estudo e desenvolvimento destes tipos de prevenção e proteção são de grande interesse para a região. Infelizmente, é muito pouco divulgado havendo pouca informação e pouco técnicos locais especializados na área que possam apresentar as soluções mais adequadas caso a caso, assumindo que a corrosão pode apresentar diferentes formas dependendo das condições existentes, logo diferentes soluções.

Deste modo, definiu-se como objetivo principal deste trabalho contribuir para o aumento do conhecimento na RAM do fenómeno da corrosão e das técnicas de prevenção e proteção anticorrosivas. Para tal, foram estabelecidos os seguintes subobjetivos:

1. Adquirir conhecimentos sobre os metais e seus constituintes;
2. Obter entendimento sobre o funcionamento do fenómeno da corrosão nos metais;
3. Estudar os tipos de corrosão e os fatores que diretamente ou indiretamente influenciam a corrosão;
4. Explorar diversas vertentes de prevenção e proteção para os metais;
5. Analisar em particular um tipo de tratamento anticorrosivo;
6. Propor diversos cenários de tratamento anticorrosivo;
7. Criticar os resultados obtidos e comparar para obter conclusões.

1.3 - Estrutura da dissertação

O presente trabalho inclui 6 capítulos, sendo que o 1º capítulo enquadra o tema geral da dissertação, expondo algumas estruturas conhecidas com problemas de corrosão e apresentando alguns números relativos ao custo da corrosão. São ainda definidos os objetivos da dissertação e descrita a sua estrutura.

O 2º e 3º capítulos contextualizam o tema “metais” onde são apresentadas as suas principais características e constituição, a sua classificação como elementos de caráter metálico na tabela periódica e como as suas propriedades afetam o seu comportamento. Seguidamente, é apresentado o fenómeno de degradação dos metais através da corrosão, os vários tipos de corrosão a que os metais estão sujeitos, também são apresentadas situações onde o produto de corrosão tem propriedades benéficas, e por fim, os fatores que influenciam o fenómeno da corrosão.

O 4º capítulo apresenta o tema principal da dissertação com os métodos de prevenção e proteção anticorrosivas existentes, desde os mais básicos, aos mais elaborados até os revestimentos protetivos possíveis, e ainda, os problemas que comprometem as proteções e o controlo e inspeção dos revestimentos de anticorrosão.

O 5º capítulo contém a análise particular de uma estrutura metálica de importante relevância ao nível da costa norte da ilha da Madeira com a apresentação de diversos cenários de um sistema anticorrosivo, comparando-os para obter a solução mais eficiente e económica ao longo de um período de 50 anos.

O 6º capítulo refere as conclusões principais da dissertação. Além da bibliografia existem ainda os quatro anexos com informação de apoio ao caso de estudo.

2

METAIS

Sendo de conhecimento geral que muitas das estruturas já existentes e por construir são, de uma forma ou de outra, constituídas ou parcialmente constituídas por metais que conferem elevada resistência aos elementos por ele constituídos, é importante preservar as suas características base.

2.1 - Evolução histórica dos metais

Os metais surgiram na denominada Era dos Metais, período que caracteriza o fim da Idade da Pedra, marcado pelo início da fabricação de ferramentas e armas de metal pelo homem há cerca de 8000 A.C..

A Era dos Metais subdivide-se na Idade do Cobre, Bronze e Ferro segundo a Tabela 1.

Tabela 1 - Idade dos Metais (Adaptado de [2])

Pré-História	Idade da Pedra	Paleolítico Mesolítico Neolítico
	Idade dos metais	Idade do Cobre Idade do Bronze Idade do Ferro
Idade Antiga	Antiguidade Oriental Antiguidade Clássica Antiguidade Tardia	
Idade Média	Alta Idade Média Baixa Idade Média	
Idade Moderna		
Idade Contemporânea		

A Era dos metais iniciou-se com a extração e fundição do cobre que foi o primeiro metal a ser trabalhado e transformado pelo Homem. Posteriormente, descobriu-se que adicionando outros minerais ao cobre obtinham-se um material como produto final mais tenaz e duradouro. Dessa forma, foi descoberto o bronze que foi muito usado em armas e ferramentas na Ásia e África (cerca de 6500 A.C), e seguidamente na Europa (cerca de 4000 A.C).

A Idade do Ferro (cerca de 3100 A.C) surgiu na Ásia e África com a utilização de carvão aquecido a altas temperaturas para a extração do ferro do seu minério. Chegou à Europa depois (2500 A.C).

Os metais foram rudimentarmente extraídos e trabalhados e, de forma progressiva, o modo de manuseamento foi sendo aperfeiçoado, havendo atualmente imensas formas de uso como em matéria-prima, de forma pura ou em matéria básica como nas ligas metálicas [2].

2.2 - Características e constituição dos Metais

Um vasto número de compostos diferentes constituem a crosta terrestre, sendo esta subdividida em duas partes, a crosta continental que é principalmente constituída por silício, alumínio e potássio, a crosta oceânica composta por minerais ricos em ferro e magnésio o que faz com que esta seja mais densa.

F. W. Clarke, em 1924 calculou a percentagem da massa para cada composto contido na crosta terrestre por meio de diversas análises em diferentes rochas expressas na Figura 5:

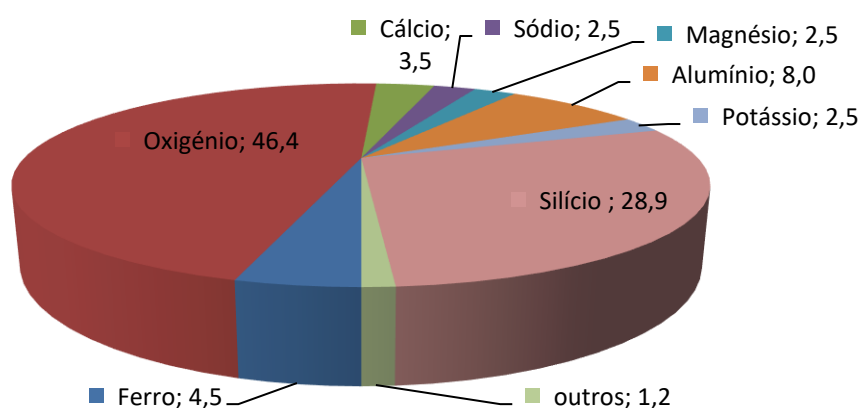


Figura 5 - Composição da crosta terrestre (%) (Adaptado de [7])

Um mineral com percentagem suficiente de um metal para extração económica é designado minério. Os minérios existem em quantidade limitada, o que significa serem um recurso limitado tendo a maior importância a sua reutilização e reciclagem em outros metais. Estima-se que cerca de 50% de alguns dos mais importantes metais utilizados atualmente são reciclados a partir de sucata

Os metais, enquanto materiais sólidos, são constituídos fundamentalmente por elementos químicos de carácter metálico (metais, metaloides ou semimetais, metais alcalinos, metais de transição, metais alcalino terrosos), de estrutura cristalina que lhes confere a capacidade de troca de eletrões de valência com outros materiais. Esta propriedade é responsável por várias características únicas, em especial (e regra geral), por uma elevada condutividade elétrica e térmica. De um ponto de vista de disposição atómica (cristalografia), são geralmente de ordenação cristalina simples, com uma alta densidade atómica e elevada simetria apesar do arranjo dos átomos e moléculas na maior parte dos materiais cristalinos não ser perfeita, confere-lhes uma considerável rigidez, resistência à tração e compressão, ductilidade, plasticidade e outras características mecânicas relevantes [2;7;8].

2.2.1 - Elementos químicos de carácter metálico

2.2.1.1 - Metais alcalinos

Os metais alcalinos são chamados assim pois reagem facilmente com a água. Essa reação forma hidróxidos, que são substâncias básicas ou alcalinas, ao libertar o hidrogénio.

Além disso, esses metais também reagem com oxigênio produzindo óxidos. Estes encontram-se representados na tabela periódica (Figura 6) no grupo 1A. Os metais alcalinos têm baixa densidade, moles, muito reativos e eletropositivos. Os elementos que estão na parte de baixo do grupo 1A possuem a eletropositividade maior e são mais reativos que os elementos de cima dessa mesma família. O hidrogênio apesar de se apresentar nessa parte da tabela, não é considerado um metal alcalino.

2.2.1.2 - Metaloides ou semimetais

Os metaloides ou semimetais, OS seus elementos químicos possuem características (físicas/químicas), tanto de metais como não metais. Os semimetais são semicondutores elétricos, térmicos, formam óxidos anfóteros¹. Estes estão representados à verde na tabela periódica (Figura 6). Esta classificação tem entrado em desuso, pois os elementos pertencentes aos Semimetais nunca foram claramente definidos oficialmente, nem pela União Internacional da Química Pura e Aplicada (IUPAC).

A tabela periódica mostra os elementos químicos organizados em grupos e períodos. Os grupos 1A e 2A são os metais alcalinos e alcalino-terrosos, respectivamente. Os grupos 3A a 8A representam os metais de transição, com o grupo 8A sendo os gases nobres. Os elementos em verde (B, Si, As, Te, Po) são os metaloides ou semimetais. Os elementos em rosa representam os metais de transição. Os elementos em amarelo (Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Rb, Sr, Cs, Ba, Fr, Ra) são os metais alcalinos e alcalino-terrosos. Os elementos em azul (H, He, N, O, F, Ne, Cl, Ar, Kr, Xe, Rn) são os gases nobres. Os elementos em cinza (Al, Ga, In, Tl, Sn, Pb, Bi, Po, At, Rn) são os metais pesados. Os elementos em verde-claro (B, C, N, O, F, Ne, Si, P, S, Cl, Ar, Ge, As, Se, Br, Kr, Sb, Te, I, Xe, Sn, Pb, Bi, Po, At, Rn) são os metaloides ou semimetais.

Figura 6 - Tabela periódica (Adaptado de [9])

2.2.1.3 - Metais de transição

A maioria dos elementos de transição possuem características semelhantes aos metais mais comuns, são duros e possuem fusão e ebulição elevado. Por serem metais, são bons condutores térmicos e elétricos. Podem formar ligas entre si, apresentam estados de oxidação variados (estados de oxidação mais amplos que outros grupos). Possuem potenciais negativos, ou seja, tendem a ceder elétrons, ainda que muitos se tornem positivos. Os Metais de Transição estão assinalados na parte central da tabela periódica à rosa (Figura 6).

2.2.1.4 - Metais alcalino-terrosos

Os metais alcalino-terrosos têm baixa densidade, são coloridos e moles. São sólidos e não reagem tão rápido com água como os metais alcalinos. Os metais alcalino-terrosos também formam hidróxidos fortemente básicos. Todos os elementos do grupo 2A possuem dois elétrons na sua última camada, e têm tendência a perdê-los. Essa eletropositividade cresce a medida que se aproxima da parte inferior da tabela periódica (Figura 6).

¹ Um composto anfótero é uma molécula ou íão capaz de reagir como sendo um ácido ou uma base.

2.2.1.5 - Metais representativos

Estão divididos de acordo com a sua configuração electrónica. Dos elementos químicos que constituem os metais representativos é de salientar o alumínio (Al), estanho (Sn), chumbo (Pb) pelas suas propriedades resistentes à corrosão. Estes estão assinalados à cinzento na tabela periódica (Figura 6).

2.2.2 - Classificação dos metais

Dentro dos apontados anteriormente, ainda podemos classificar como metais ferrosos e metais não ferrosos.

2.2.2.1 - Metais ferrosos

Os metais ferrosos têm a participação do ferro na sua constituição. Consistem em ligas metálicas, ou seja, são uma mistura de ferro com outros elementos como o silício e o carbono.

Estes produzem:

- Ferro forjado (até 0.15% carbono);
- Aço (mistura com carbono até 2%);
- Ferro fundido (mistura com silício e carbono superior a 2%);
- Aço inoxidável (mistura com carbono, cromo, níquel).

2.2.2.2 - Não ferrosos

Os metais não ferrosos, simplesmente são os metais que não têm ferro na sua constituição ou está presente em pequena quantidade. Estes tendem a ser mais caros e apresentam melhor resistência à corrosão e a baixas temperaturas, mas também menor resistência mecânica e menor resistência a elevadas temperaturas que o aço carbono. Ainda são possíveis variadas ligas metálicas com a fusão de diversos elementos não ferrosos. As ligas metálicas não passam de uma mistura de dois ou mais elementos sendo pelo menos um deles de características metálicas. As ligas são obtidas na fusão conjunta dos elementos através do aquecimento a elevadas temperaturas [2;8].

2.2.3 - Estrutura cristalina dos metais

A estrutura física dos materiais sólidos depende fundamentalmente do arranjo estrutural dos átomos constituintes, dos seus iões e moléculas. Em termos de estrutura física existem os sólidos cristalinos e sólidos não-cristalinos ou amorfos.

2.2.3.1 - Sólidos não-cristalinos ou amorfos

Em geral, não apresentam regularidade na distribuição dos átomos e podem ser considerados como líquidos extremamente viscosos como o vidro e vários polímeros.

2.2.3.2 - Sólidos cristalinos

Seus átomos ou moléculas apresentam uma rede tridimensional bem definida que é repetida infinitamente (célula unitária), ou seja, tem ordenação espacial a longa distância. Esta estrutura encontra-se presente em todos os metais e a maior parte das cerâmicas (Figura 7).

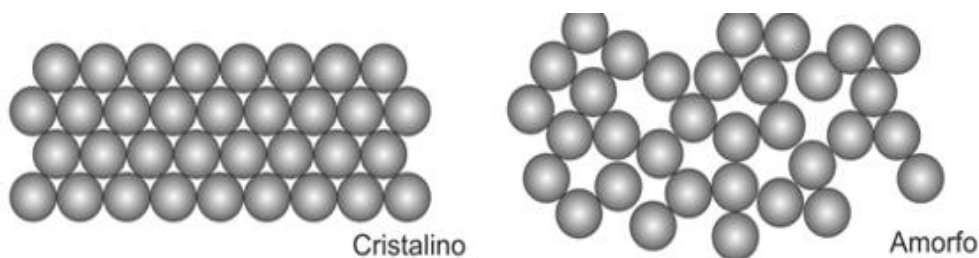


Figura 7 - Estrutura cristalino vs amorfo [8]

Existem cerca de 14 estruturas cristalinas de metais diferentes, no entanto, no aço surgem dois tipos de arranjo atômico (Figura 8) que caracterizam as suas propriedades:

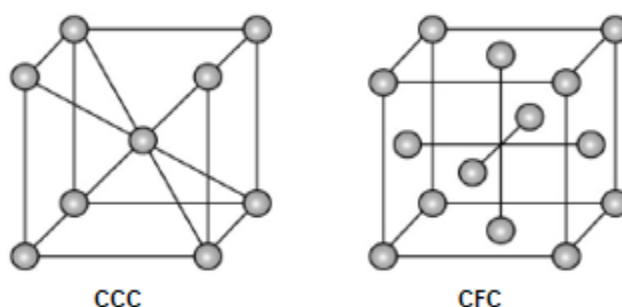


Figura 8 - Estruturas cristalinas de arranjo atômico CCC e CFC dos metais [8]

O ferro como substância pura não tem aplicação industrial significativa. No entanto, as ligas que contêm ferro (composto principalmente por ferro), são de intensa e ampla aplicação industrial o que revela importância o conhecimento da sua formação e fragilidades.

2.2.3.3 - Fases do ferro e aço

Diferentes microestruturas são possíveis através do controle da velocidade de arrefecimento e composição do metal, tendo influência nas propriedades mecânicas e tendência à corrosão (Figura 9). Logo, algumas propriedades do metal podem ser adaptadas as circunstâncias pretendidas ou escolhidos os metais que melhor se adaptam à necessidade. O tamanho dos grãos também podem ser relativamente controlados o que dão maior eficácia em termos de prevenção à corrosão.

A microestrutura depende das fases presentes, morfologia de cada fase, proporção de cada fase segundo a Figura 9.

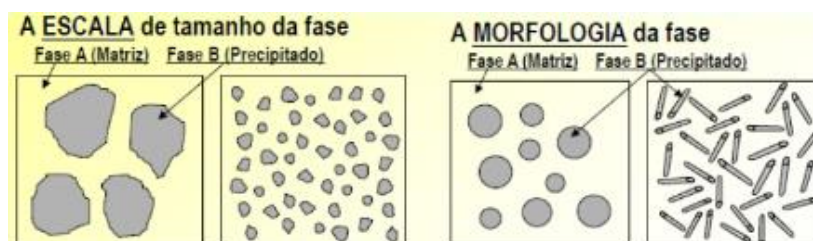


Figura 9 - Proporção e morfologia da fase [8]

As fases ou microconstituintes provêm da decomposição austenítica, controlando a velocidade de arrefecimento e a quantidade de carbono, originando:

- Austenite;
- Ferrite;
- Perlite;
- Bainite;
- Martensite.

A Tabela 2 apresenta a influência da microestrutura nas propriedades dos metais:

Tabela 2 - Influência da microestrutura nas propriedades dos metais (Adaptado de [10])

Micro constituintes	Resistência à tensão	Resistência ao impacto	Resistência à fadiga	Ductilidade	Rigidez	Formado a frio	Solda bilidade	Corrosão
Austenite	↓	↑↑	↓	↑	↑	↑	↓	↑
Ferrite	↓↓	↑	↓↓	↑	-	↑↑	↑↑	-
Pearlite	↑	↓	↑	↓	-	↓	↓	-
Bainite	↑↑	↓	↑	-	↑	↓	↓	-
Martensite	↑↑↑	↑	↑↑	-	↑↑	↓	↓	-
Carbonetos	↑↑	↓↓	↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓↓	-
Tamanho do grão	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Inclusões	-	↓	↓↓	↓	↓	↓	-	-

↑ - Razoável

↑↑ - Bom

↑↑↑ - Muito bom

↓ - Pouco razoável

↓↓ - Mau

↓↓↓ - Muito mau

Ainda são possíveis outras fases como a cementite que surge da ferrite, ledeburite que pode ser composta por perlite e cementite, austenite e cementite, dependendo da temperatura de austenitização.

A decomposição da austenite pode produzir microestruturas que variam em morfologia com a variação no arrefecimento. Isto surge pelo facto de ser controlado pelos processos de nucleação e crescimento (N&G), que são influenciados pela velocidade de arrefecimento.

2.2.3.4 - Nucleação e crescimento (N&G)

A nucleação é o primeiro passo na cristalização. Logo, este determina a formação dos grãos. Na Figura 10 é possível constatar que quanto maior for a nucleação, menor será o crescimento e vice-versa.

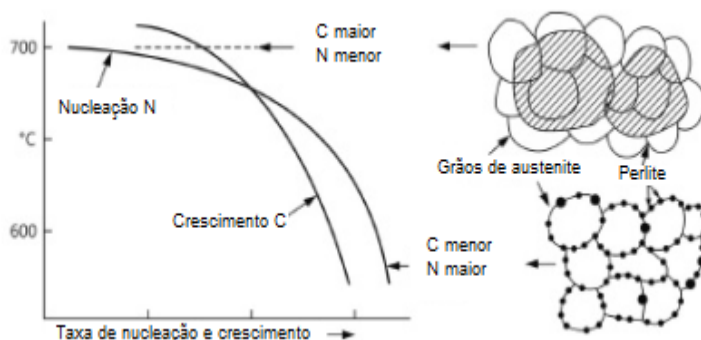


Figura 10 - Relação entre nucleação e crescimento N&G [10]

2.2.3.5 - Diagrama de equilíbrio Fe-C

O diagrama de equilíbrio Fe-C (Figura 11) representa o sistema de ferro-carbono que separa o aço do ferro fundido e facilita o seguimento da solidificação tal como os processos das fases de transformação para a composição Fe-C e a microestrutura resultante.

Na Figura 11 surgem quatro temperaturas críticas para o aço (A_1 , A_2 , A_3 , A_{cm}), que representam pontos de mudança de fase. Denote-se que apesar do martensite ser muito utilizado em metais como aços inoxidáveis, não surge no diagrama [8;10].

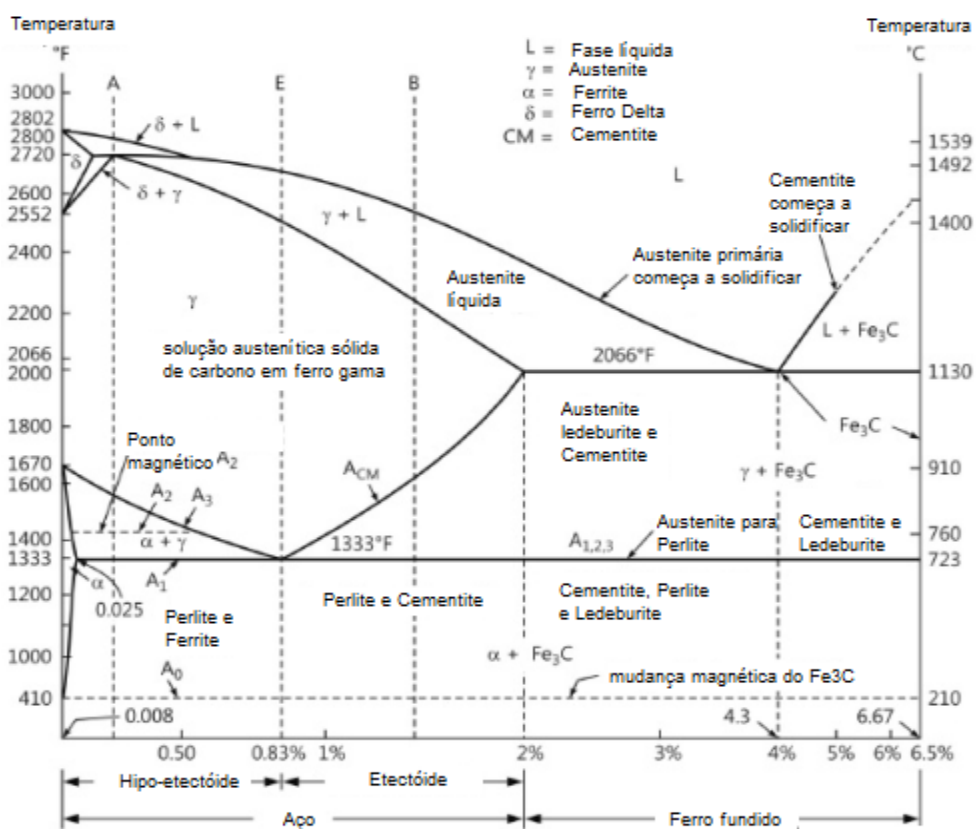


Figura 11 - Diagrama das fases do aço e ferro com variação do carbono [10]

3

CORROSÃO NOS METAIS

A corrosão é um processo de deterioração comum principalmente em metais. Porém, o termo corrosão é frequentemente associado à deterioração dos materiais metálicos e não metálicos, pela ação do meio.

A deterioração do material metálico provoca alterações prejudiciais nos seus elementos, produzindo um material diferente do original, provocando alterações nas principais propriedades, nomeadamente a resistência mecânica, ductilidade, elasticidade, estética, etc.

Infelizmente, todos os metais sofrem de algum tipo de corrosão. A transformação de um minério em metal necessita de processos baseados na introdução de energia, normalmente em forma de calor. A quantidade de energia necessária para converter o minério em metal, varia de metal para metal. Os metais como produto final tendem a reagir com elementos no meio produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza dos quais foram ou poderiam ter sido extraídos. A perda da energia armazenada no metal surge através da corrosão (Figura 12). Logo, a corrosão pode ser considerada como o retorno ao estado inicial.

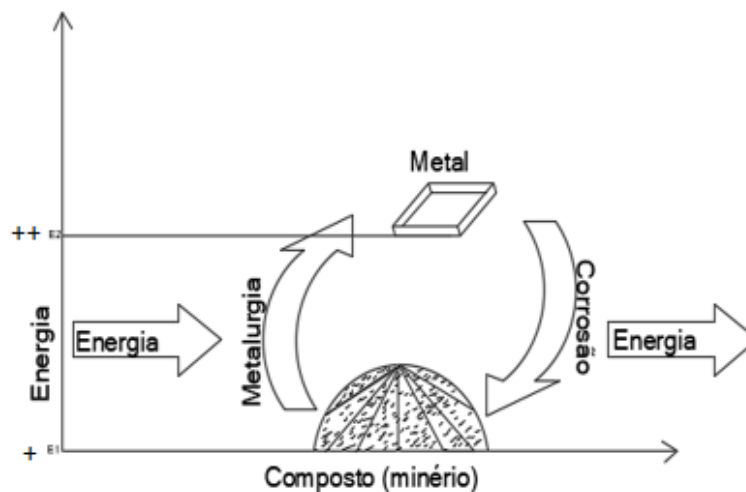


Figura 12 - Ciclo do minério (Adaptado de [11])

Segundo Fontana, os aspetos termodinâmicos² e eletroquímicos³ são muito importantes para um melhor entendimento e controlo da corrosão. Um estudo termodinâmico indica a direção espontânea da reação, logo, cálculos termodinâmicos podem dar uma noção teórica se a corrosão pode ou não acontecer.

² Termodinâmica é o ramo da física que estuda as relações entre o calor, temperatura, trabalho e energia.

³ Qualquer reação que possa ser dividida em 2 ou mais reações parciais de oxidação e redução é considerada eletroquímica.

3.1 - Mecanismos de corrosão

A corrosão pode ser classificada em dois tipos de mecanismos:

3.1.1 - Corrosão eletroquímica ou húmida

Ou designada por aquosa, molhada, eletroquímica ou de baixa temperatura. Envolve soluções aquosas ou, de uma forma mais abrangente, soluções eletrolíticas⁴ (conductoras iónicas).

É a forma mais comum de corrosão que ocorre na presença de circuito eletroquímico ou na eletrólise⁵, onde se verificam transformações de oxidação/redução com transferências elétricas das regiões anódicas para as catódicas.

Para a formação deste circuito (Figura 13) é necessário:

1. O ânodo – Consiste no metal que é corroído (perde eletrões).
2. O cátodo – Pode ser um metal ou outro elemento condutor (ganha eletrões).
3. A conexão – É necessário para possibilitar a migração de eletrões entre o ânodo e o cátodo (condutor).
4. O eletrólito – Possibilita a migração dos iões entre o cátodo e o ânodo, sendo importante na formação dos produtos de corrosão.

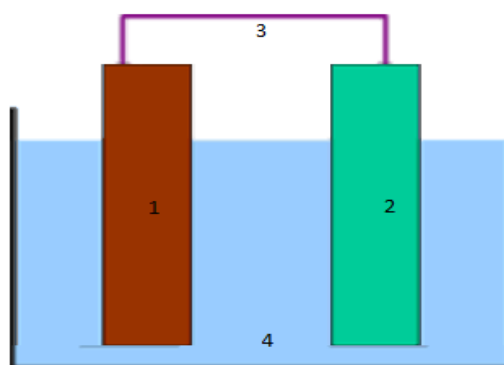


Figura 13 - Circuito de uma pilha

Através da comparação do circuito com o que sucede nas pilhas ou baterias, temos uma melhor perceção de como o fenómeno funciona.

3.1.1.1 - Comparação mecanismo de corrosão/Pilha

As pilhas ou baterias passam por um fenómeno natural de transferência de eletrões de um material para outro. Nas pilhas podemos encontrar dois tipos de materiais diferentes (elétrodos), sendo um o ânodo (com um metal mais reativo⁶), e outro o cátodo (metal menos reativo), envolvidos num eletrólito. Sendo um mais reativo que o outro, ocorre a migração de eletrões do ânodo para o cátodo, o que gera corrente elétrica através da energia química. A reação fornece energia ao sistema somente até que a reação química se esgote.

⁴ Reação que ocorre pela passagem de corrente elétrica através de um sistema líquido.

⁵ Processo eletrolítico ou reação não espontânea em que a energia elétrica é transformada em energia química.

⁶ Relativo à sua electropositividade. Quanto mais eletropositivo, maior tendência tem para perder eletrões.

A diferença de potencial de uma pilha é calculado através do potencial padrão do ânodo e cátodo, sabendo que o cátodo é sempre o de maior valor.

$$E_{\text{pilha}} = E^0_{\text{cátodo}} - E^0_{\text{ânodo}} \quad \text{Equação (1)}$$

3.1.1.2 - Eléttrodo

O eléttrodo (Figura 14) é simplesmente um metal envolvido num eletrólito. Esta envolvência entre o metal e o eletrólito desenvolve uma diferença de potencial elétrica local que, pode ser positiva, negativa ou neutra dependendo do metal e do eletrólito, para além de outras variáveis.

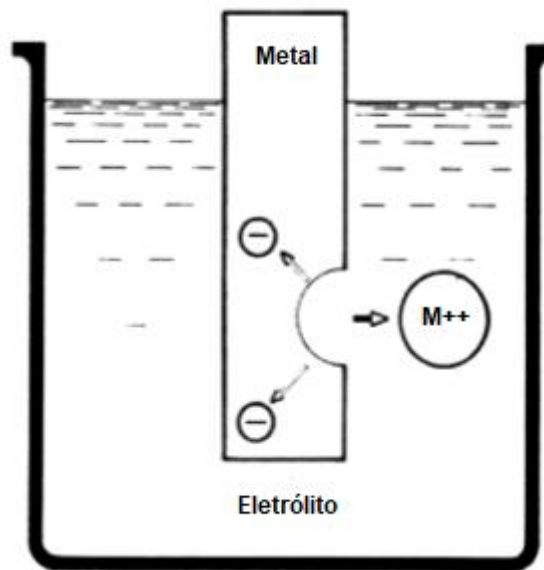


Figura 14 - Eléttrodo [12]

A reação entre estes resulta na dissolução de material metálico que passa para a solução sob a forma de cátions, libertando então os elétrons. Logo, a diferença de potencial deve-se às cargas de sinal oposto presentes na interface metal/eletrólito.

3.1.1.3 - Eléttrodo de referência

Consiste em um metal imerso numa solução específica de íons onde se pretende que seu potencial seja constante independentemente do eletrólito, variação de temperatura e outros. As suas propriedades devem manter-se constantes ao longo do tempo. É utilizado como meio de comparação entre potenciais.

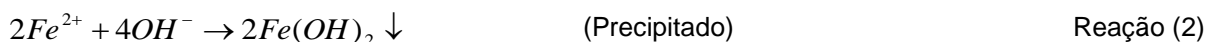
Um eléttrodo de referência usualmente utilizado é o eléttrodo padrão do hidrogénio (SHE) com o equilíbrio entre íons de hidrogénio e hidrogénio gasoso dado por:



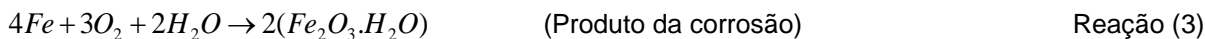
O eléttrodo de hidrogénio é composto por eléttrodo de platina imerso em solução de íons de hidrogénio com hidrogénio gasoso H_2 sendo borbuhlado à pressão de 1 atm.

3.1.1.4 - Reações químicas

A natureza da corrosão pode ser demonstrada de forma geral pelas seguintes reações, no caso do ferro imerso em água doce ou salgada exposta à atmosfera.



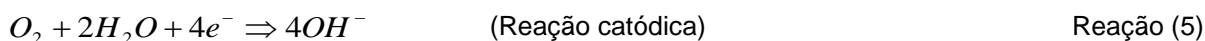
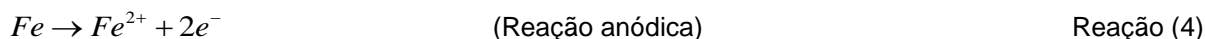
O precipitado oxida no contato com o ar formando a vulgar "ferrugem".



De notar que a diferença de água doce para a salgada é a percentagem de cloreto de sódio (NaCl) que não surge na reação pois nela não participa ativamente. Em outras situações, os cloretos podem ter uma influência mais localizada. Tal é explicado mais à frente.

As reações químicas relacionadas com a corrosão podem ser muito variadas dependendo do meio e dos metais expostos. Para uma melhor compreensão geral do fenómeno, serão apresentadas as reações parciais (eletroquímicas) em substituição das reações totais pela forma simplificada e equivalente em muitos dos metais.

No caso do ferro:



O resultado é o produto de corrosão na Reação (3).

Reações anódicas:

A reação anódica baseia-se na alteração do número de oxidação, nomeadamente a perda de eletrões.



Os eletrões uma vez livres, têm a tendência a migrarem para áreas catódicas ocorrendo reações de redução. Tendo um potencial elétrico superior ao ânodo, nas áreas catódicas verificam-se reações de consumo dos eletrões com alguma espécie redutora lá existente desde que verificada a conexão entre o ânodo e o cátodo. É importante salientar que nas áreas anódicas, após as reações terem efeito, tende a surgir o produto da corrosão.

No caso geral, o eletrólito mais comum é a água que tem boa condutividade mas esta é variável e depende da quantidade de iões na solução.

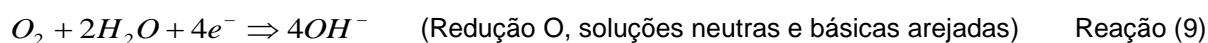
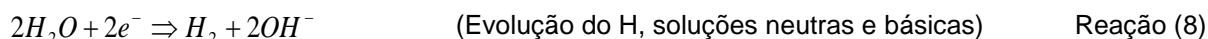
Reações catódicas:

Na corrosão existem duas reações catódicas fundamentais:

- Em meio ácido – normalmente existe excesso de catiões de hidrogénio (H⁺), podendo haver redução do oxigénio em meios arejados.
- Em meio ácido a alcalino - essencialmente a redução do oxigénio.

O produto da reação catódica tende a migrar pela solução e reage com o metal dissolvido precipitando o produto de corrosão.

Exemplos de reações catódicas:



3.1.1.5 - Diferença de potencial, intensidade de corrente e densidade de corrente

A diferença de potencial está intrinsecamente ligada com a intensidade de corrente, sendo que quanto maior for a diferença de potencial, maior será a carga (Q) de elétrons a migrarem por unidade de tempo.

A diferença de potencial deve-se ao campo elétrico existente entre dois pontos de carga oposta. Supondo que o ponto A tem carga negativa devido ao excesso de elétrons e o ponto B tem carga positiva devido a falta, tendo o campo elétrico o sentido de A para B. Os elétrons livres tendem a deslocar-se no sentido das reações de redução em B, levando a criação de corrente elétrica.

A intensidade de corrente é designada pelo Sistema Internacional (SI) por Coulomb/segundo (C/s), ou seja Ampere (A).

A densidade de corrente é a quantidade de carga elétrica por unidade de tempo que passa em determinada área de superfície e é caracterizado em A/m².

3.1.1.6 - Termodinâmica na corrosão

Da termodinâmica, sabe-se que o critério de equilíbrio de uma reação a uma dada temperatura e pressão é o de que seja nula a respetiva variação de energia livre (ΔG). Logo, em equilíbrio é possível a obtenção dos potenciais padrão.

A termodinâmica estuda as transformações de energia e permite avaliar se a reação é espontânea ou não. Em situações em que a energia livre é negativa, significa a perda de energia sendo a reação espontânea (na ausência de fatores externos). No caso da energia livre positiva, significa a necessidade de um aumento de energia para haver reação.

Logo, através de uma avaliação termodinâmica consegue-se uma previsão se uma dada reação pode ocorrer de forma espontânea, no entanto, não permite prever o tempo necessário e a velocidade para acontecer. Para uma avaliação termodinâmica em um sistema aquoso, existe a necessidade de considerar as reações químicas possíveis, analisadas pela lei de ação das massas e as reações eletroquímicas através da equação de Nerst:

$$\Delta G = -nFE \quad \text{Equação (2)}$$

Com:

ΔG - A variação da energia livre química;

n - Número de elétrons envolvidos na reação;

F - Constante de Faraday (96485 Coulomb/mol) ou seja, a carga elétrica correspondente a uma mole de elétrons;

E - Potencial do eletrodo.

As seguintes equações representam como chegar ao diagrama Pourbaix.

$$-nFE = -nFE^o + RT \ln \frac{\text{produtos}}{\text{reagentes}} \tag{Equação (3)}$$

Provém:

$$E = E^o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{red}}{a_{oxid}} \tag{Equação (4)}$$

Com:

E^o - Potencial padrão;

R - Constante termodinâmica dos gases (8,314 J/mol.K);

T - Temperatura absoluta (K);

a_{red} - Atividade das espécies reduzidas;

a_{oxid} - Atividade das espécies oxidadas.

Esta equação tem mais lógica convertendo a atividade em concentração, sabendo que a atividade (a) é proporcional à concentração (C), multiplicando por um fator chamado coeficiente de atividade (γ), que em soluções diluídas é aproximadamente um, ficamos com:

$$E = E^o + \frac{RT}{nF} * 2.3 \log C \tag{Equação (5)}$$

Pela concentração do hidrogénio na solução (H^+ e OH^-), obtemos o pH.

A água pode decompor-se de duas formas dependendo do potencial e pH. A região entre as linhas “a” e “b” delimitam o domínio de estabilidade da água. Acima da linha “a” a decomposição é preferencialmente com a libertação do oxigénio. Abaixo da linha “b” é preferencialmente por hidrogénio. A redução do hidrogénio é comum em meios ácidos, enquanto a redução do oxigénio é mais comum no meio alcalino (Figura 15).

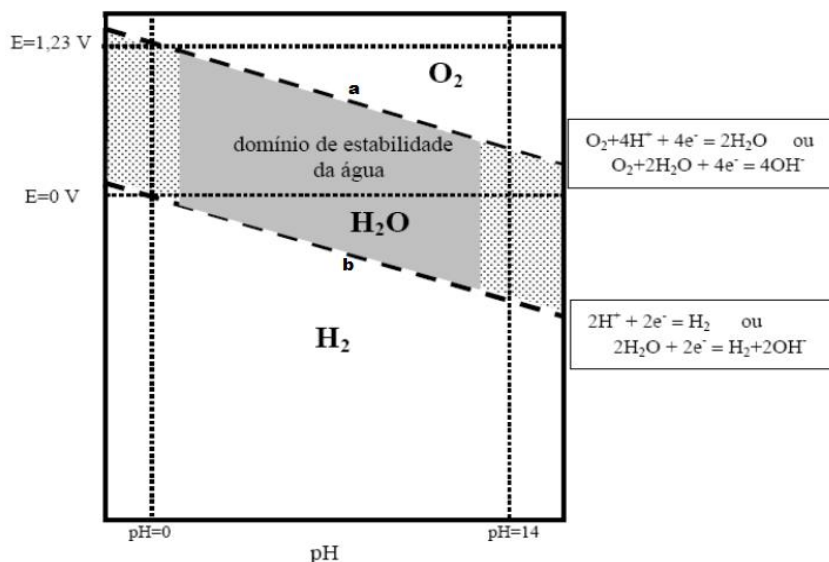


Figura 15 - Domínio de estabilidade da água [12]

Através da termodinâmica, Pourbaix descobriu uma relação, para sistemas em equilíbrio, entre o potencial de elétrico e o pH das soluções. A relação ficou conhecida como os diagramas de Pourbaix, e é válida para vários metais envolvidos em água.

Marcel Pourbaix representou as condições de equilíbrio entre os elementos metálicos imersos em água, traçando os domínios de estabilidade termodinâmica de cada um deles. Na Figura 16 apresenta-se o diagrama de equilíbrio E vs pH, de forma simplificada para um sistema a 25°C.

Da Figura 16 é possível observar que onde o ferro está na sua forma mais estável (Fe), existe uma zona de imunidade localizada em potenciais negativos ou mais catódicos. Na zona de baixos potenciais F^{++} e para altos potenciais F^{+++} , são zonas propícias à corrosão pois a película produzida é solúvel. A outra zona é caracterizada pela formação de uma película estável na face do metal em uma larga faixa de pH pela formação de hidróxidos. Sendo garantidos alguns fatores abordados mais à frente pode-se admitir uma diminuição na taxa de corrosão através da passivação.

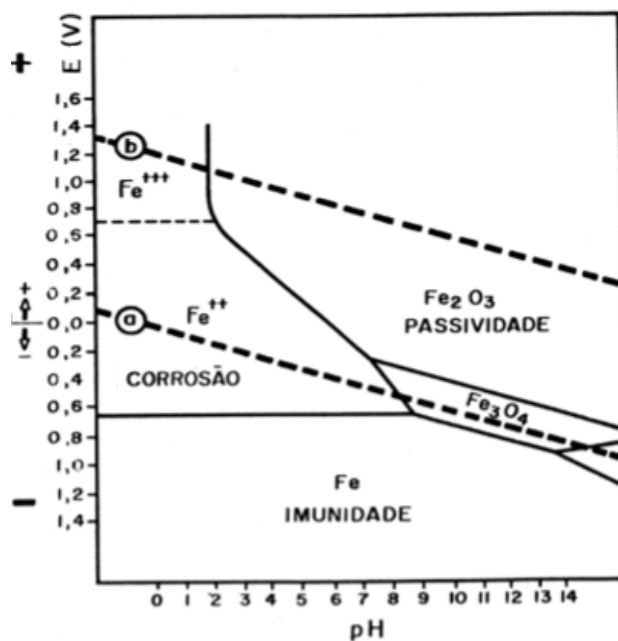


Figura 16 - Diagrama de equilíbrio para sistema Fe/H₂O [12]

Estas reações são de alguma forma gerais envolvendo o potencial (presença de eletrões) e pH (presença de iões H⁺ e OH⁻). Outras condições não dependem do potencial nem pH, sendo representadas por retas verticais e horizontais respetivamente.

O diagrama de Pourbaix revela muita utilidade, entretanto, este é baseado em dados termodinâmicos, em meio aquoso à 25°C, à pressão de 1 atm em condições de equilíbrio. No entanto, em sistemas que não se verifiquem estas condições, podem levar a erros graves.

3.1.1.7 - Polarização de um eléctrodo

Num mecanismo eletroquímico de corrosão, o potencial de um eléctrodo desenvolve-se quando o sistema entra em equilíbrio. Se através de um potencial externo, houver alterações do potencial normal de um eléctrodo, diz-se que houve polarização.

A diferença entre o potencial de equilíbrio (E_{corr}) e o resultado final após a polarização (E) dá o valor da polarização.

$$\eta = E - E_{corr}$$

Equação (6)

Se for η positivo, diz-se que houve polarização anódica. Se η for negativo, diz-se que houve polarização catódica. Em casos de polarização anódica, o potencial do metal é tornado mais nobre, ou seja, há uma maior diferença de potencial, dando condições para libertação de eletrões e esta representa uma força motriz para a corrosão (Figura 17). Em casos de polarização catódica, o efeito é inverso e pode levar a casos de imunidade [11;12].

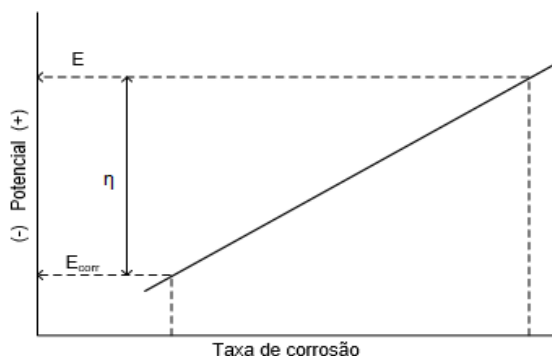


Figura 17 - Potencial/taxa de corrosão [12]

3.1.2 - Corrosão química ou seca

Também designada por oxidação direta ou de alta temperatura, entre um metal e a atmosfera, na ausência de água, ou seja, sem transporte iónico em solução líquida. A corrosão seca ocorre na ausência da fase líquida ou acima do ponto de orvalho do ambiente circundante. Os vapores e gases são usualmente os agentes deste tipo de corrosão. Os gases muito associados a este tipo de mecanismo têm usualmente oxigénio presente na sua constituição, daí o nome oxidação. Outros podem surgir através de elementos como o hidrogénio. A corrosão seca é frequentemente associada a altas temperaturas, tendo como exemplo o aço atacado por gases de fornos em funcionamento ou quando é colocada uma barra de aço sobre fogo, é perceptível a formação de uma camada oxidada.

A velocidade da corrosão seca pode variar de metal para metal como resultado dos mecanismos envolvidos e o oxigénio estar em contacto com a superfície do metal. A oxidação baseia-se na perda de eletrões, e depende da condutividade dos óxidos pela necessidade dos iões terem de mover-se através do produto de corrosão. Com o aumento da temperatura, verifica-se um aumento da mobilidade dos iões o que provoca um aumento na oxidação (Figura 18).

A oxidação é o produto da reação química entre o metal e o agente corrosivo (oxigénio). O produto da corrosão forma-se na superfície exposta do metal, apresentando uma película que, dependendo das condições de processo da reação e do metal em questão, podem apresentar propriedades distintas.

A película formada na superfície, em alguns casos conhecidos chega a desenvolver propriedades protetoras ao metal, dificultando o acesso do oxigénio e outros agentes corrosivos. Este processo tem o nome de passivação abordado mais à frente.

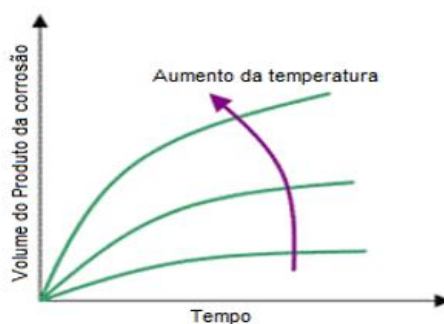
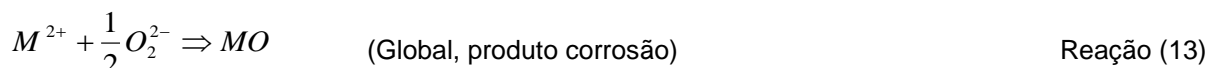
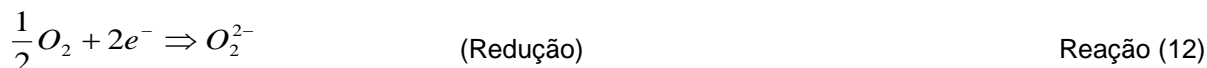


Figura 18 - Oxidação [13]

3.1.2.1 - Análise morfológica da corrosão seca através do oxigénio

A oxidação tal como a corrosão aquosa é um processo eletroquímico e não apenas a combinação química de metal e oxigénio em uma escala molecular, consistindo em dois processos separados.

Exemplo prático:



Na corrosão seca, os átomos do metal têm tendência a perder eletrões, formando iões positivos do metal na interface metal-óxido, tendo o efeito de oxidação. O oxigénio sofre uma reação de redução recebendo os eletrões cedidos pelo metal na interface do óxido-gás.

Assumindo que qualquer óxido de metal tem a capacidade de conduzir eletrões e iões, a reação acontece sem a ajuda de um condutor elétrico externo entre o ânodo e cátodo local. Logo, o óxido tem um papel importante neste tipo de mecanismo que vai desde condutor iónico (eletrólito), condutor elétrico, eléctrodo de redução do oxigénio e barreira de difusão de passagem de iões e eletrões, quando há condições para isso.

A condutividade iónica e eléctrica da película óxida determina a velocidade de oxidação do metal. Na Figura 19 percebe-se a importância da função que o óxido garante à corrosão seca.

Na corrosão seca, a fatia mais relevante é a oxidação, mas existem outras de menor relevância tais como:

- Corrosão em ambientes sulfúricos – degradação de metais à alta temperatura quando expostos a compostos de enxofre provocam a sulfidação.
- Ataque por hidrogénio – aço exposto a altas temperaturas reagem com o hidrogénio, provocando a decarbonização que leva a perda de resistência por parte do metal.

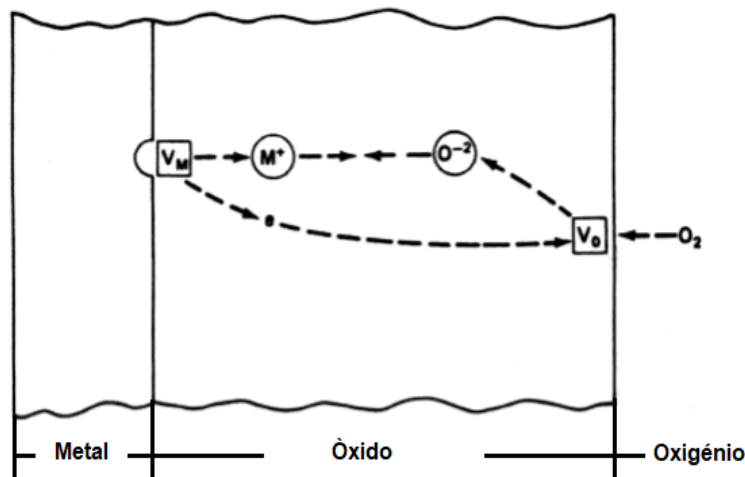


Figura 19 - Esquema de oxidação [11]

3.1.3 - Taxa de corrosão

A taxa de corrosão por ação química e eletroquímica é um parâmetro importante a ter em conta pelo facto de dar um valor aproximado da corrosão ao longo do tempo ou pela intensidade de corrente presente.

Através do CPR (*Corrosion Penetration Rate*), é possível calcular a perda de material por unidade de tempo:

$$CPR = \frac{K.W}{\rho.A.t} \quad \text{Equação (7)}$$

Com:

W - Perda de peso após um tempo de exposição t (mg);

K - Constante que depende do sistema de unidades utilizado. (87,6 para mm/ano);

A - Área de exposição (cm^2);

ρ - Densidade do metal (g/cm^3);

t - Tempo (horas).

Através da intensidade, também é possível ter valores para a taxa de corrosão CR (*Corrosion Rate*), através da lei de Faraday:

$$m = \frac{M.i.t}{n.F} \quad \text{Equação (8)}$$

Com:

i - Intensidade de corrente;

n - Número de eletrões na ionização de cada átomo metálico;

F - Constante de Faraday (96485 Coulomb/mol);

M - Peso atómico do metal (g);

m - Massa de aço consumido (g);

t - Tempo (s).

Convertendo a massa do aço consumido (m) em espessura (e) temos:

$$\frac{e}{t} = \frac{M.i}{n.\rho.A.F} \quad \text{Equação (9)}$$

Obtém-se valores para taxa de corrosão, normalmente em $\mu\text{m/ano}$.

A taxa de corrosão pode depender também de outros fatores que afetam o circuito da corrente, como o tipo de polarização existente [11].

3.1.4 - Passivação

Alguns metais têm uma redução da sua taxa de corrosão quando este se encontra acima de um potencial crítico (E_p). Metais como o ferro, crómio, níquel, cobalto, titânio e outras ligas, são normalmente envolvidos por uma película protetora de óxidos ou outros produtos que resultam de corrosão superficial que formam um obstáculo às trocas iónicas metal/solução e o acesso do oxigénio utilizados pelo mecanismo de corrosão. O fenómeno tem o nome de passivação (Figura 20).

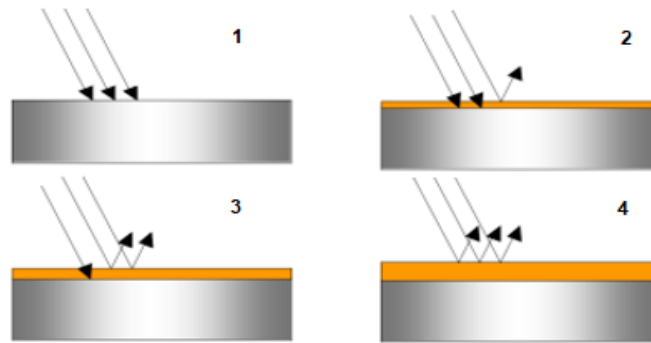


Figura 20 - Passivação [13]

No entanto, nem todas as películas formadas nos metais são protetoras. Se estas não tiverem uma formação contínua na superfície exposta do metal, o contacto com o agente redutor não é suprimido. Se houver formação de película em excesso, ou seja, área maior do que a área de exposição do metal, pode-se observar o empolamento ou bolhas na película (Figura 21).



Figura 21 - Película não contínua (esquerda) e com bolha (direita) [13]

A passivação dá-se em meios alcalinos para quase todas ligas de ferro e em potenciais baixos. No entanto, com o aumento do potencial e da alcalinidade para valores muito elevados, o fenómeno pode deixar de ter efeito (Figura 22).

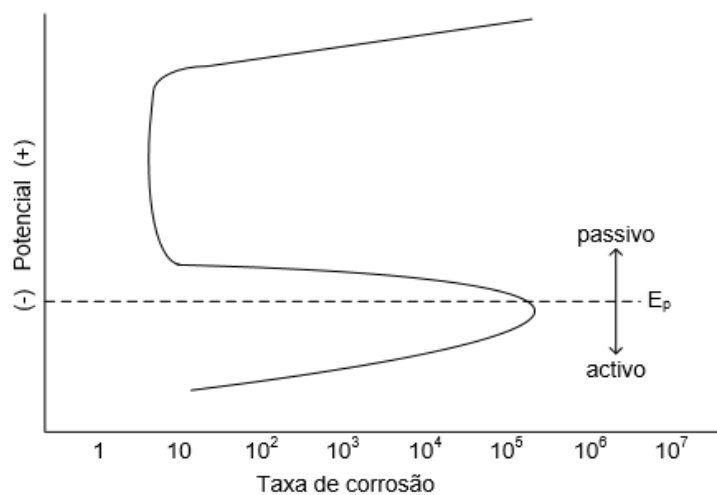


Figura 22 - Potencial crítico/Taxa de corrosão [12]

Porém, desta situação surge um dos processos de inibição de corrosão através da polarização chamada proteções anódicas analisada mais à frente.

Os produtos da corrosão ainda podem ser solúveis ou insolúveis. Os solúveis são desfavoráveis à proteção enquanto os insolúveis podem servir de barreira aos agentes corrosivos. Esta situação também é analisada mais à frente [11;12].

3.1.5 - Tipos de corrosão

A corrosão é o problema mais relevante em elementos constituídos por metal e esta pode apresentar-se de várias formas. Algumas podem ser facilmente identificáveis e outras nem por isso. A identificação correta do tipo de corrosão e dos mecanismos por ela utilizados levam a uma melhor prevenção ou solução para o problema em termos da proteção.

São identificados oito tipos principais de corrosão. Alguns dos tipos de corrosão são formas particulares de corrosão de outras mais generalizadas. Alguns são visíveis através de uma inspeção visual, outros necessitam de visualização mais minuciosa (Figura 23).

Através de descrição mais pormenorizada temos uma melhor visão do assunto.

3.1.5.1 - Corrosão uniforme

É uma forma comum de corrosão que consiste em reações eletroquímicas (Figura 24). Esta ocorre de forma generalizada por toda a superfície a velocidades semelhantes. Por esse facto, podemos verificar que o metal perde espessura de forma relativamente uniforme. A taxa de corrosão do metal pode variar pela capacidade da formação de produtos solúveis ou insolúveis. No caso de haver formação da película (insolúvel, ou estado passivo), a taxa de corrosão não é de fácil previsão ao contrário da situação da não existência de película que apresenta uma velocidade mais constante (produtos solúveis ou ativos).

Este tipo de corrosão é mais suscetível em metais mais reativos (aço, zinco, alumínio) ou em meios mais corrosivos.

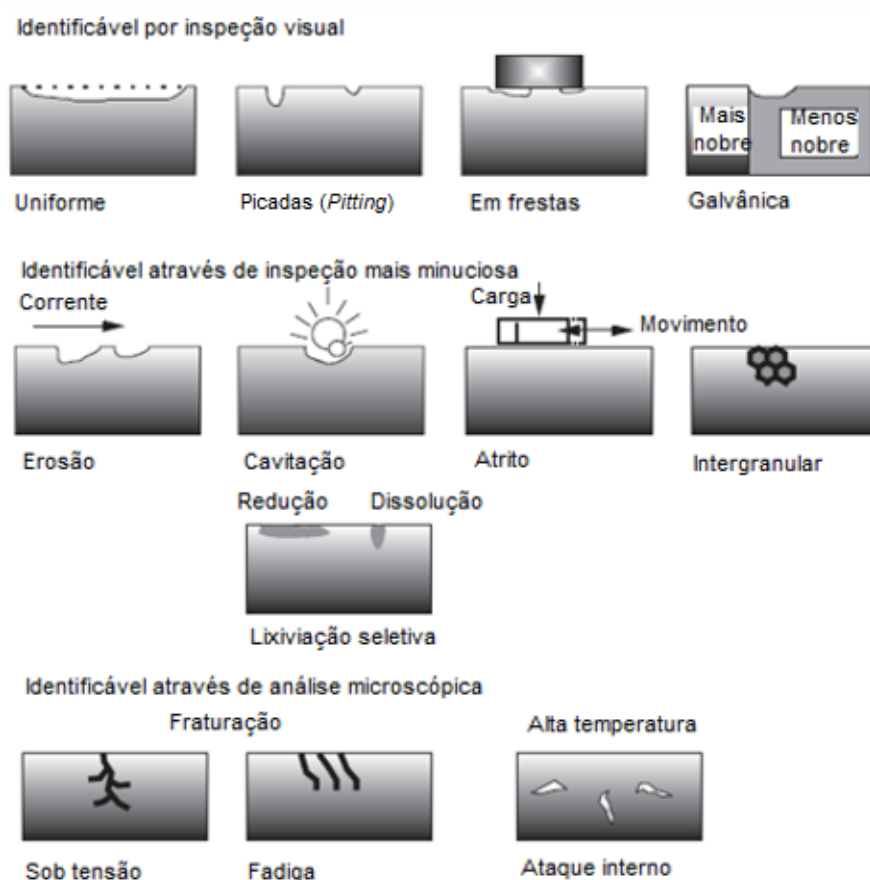


Figura 23 - Tipos de corrosão [14]

A ação deste tipo de corrosão pode ser diminuída através de:

- Aplicação de revestimentos de proteção à corrosão;
- Utilização de inibidores à corrosão;
- Proteção anódica;
- Proteção catódica.



Figura 24 - Corrosão uniforme

3.1.5.2 - *Pitting* ou corrosão por picadas

É uma forma extrema de corrosão localizada que resulta em pequenos orifícios no metal. Os orifícios podem ser isolados ou em conjunto, dando um aspeto irregular à superfície. O fenómeno é frequente em metais com películas protetoras e revestimentos. No caso das películas protetoras, os cloretos dificultam a repassivação da área afetada por levarem a formação de produtos de corrosão mais solúveis.

A profundidade das picadas são normalmente equivalentes ao seu diâmetro e são difíceis de detetar pelo seu pequeno tamanho e por ficarem cobertos por produtos de corrosão. A sua previsão é difícil mesmo em testes de laboratório. As picadas por vezes são consideradas como um passo intermédio entre isenção de corrosão e corrosão generalizada (Figura 25).

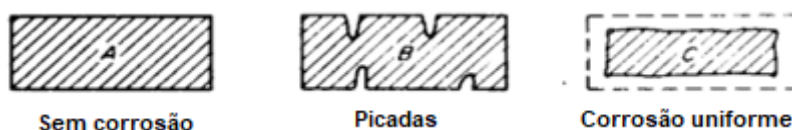


Figura 25 - Picadas ou *pitting* [11]

A corrosão por picadas inicia-se em zonas mais fracas ou defeituosas. Há dissolução do metal no interior das picadas enquanto a redução do oxigénio surge no exterior. A dissolução rápida do metal no interior das picadas tende a produzir um excesso de catiões, resultando na migração de cloretos para manter a eletroneutralidade. O processo é auto estimulante e propaga-se sozinho. A elevada concentração de cloretos metálicos (M^+Cl^-), e de aniões de hidrogénio aceleram o processo de dissolução tal como na corrosão em frestas. Como a solubilidade do oxigénio é nula em soluções concentradas, as reações de redução são praticamente interrompidas no interior. Ironicamente as picadas funcionam como um ânodo de sacrifício (proteção catódica), mantendo o restante superfície metálica sã (Figura 26).

Os sintomas deste tipo de corrosão não são imediatos. Estes podem requerer vários meses ou anos para começar haver sinais de picadas pois dependem da combinação do metal/meio corrosivo.

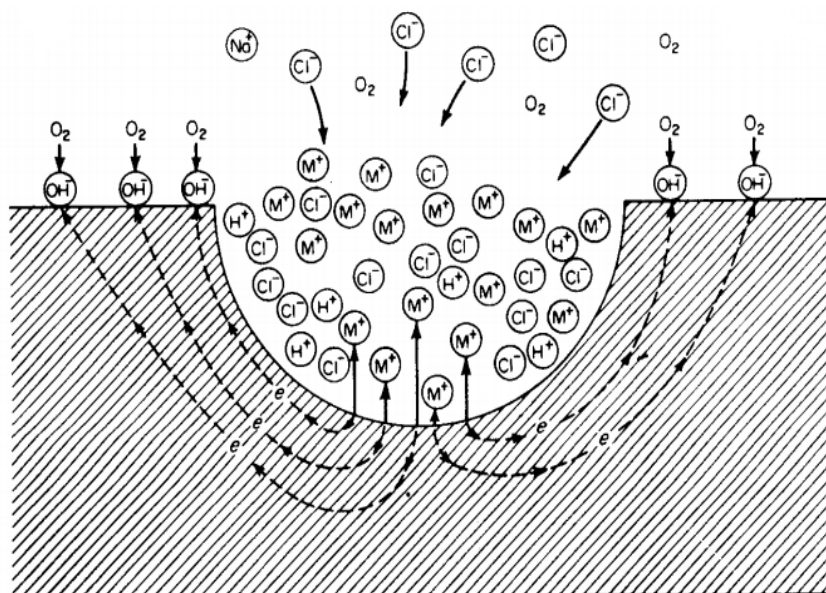


Figura 26 - Processo no interior da picada [11]

Como modo de prevenção, é possível minimizar este tipo de corrosão através de algumas precauções:

- Utilização de ligações soldadas em substituição de rebitadas e aparafusadas;
- Fechar completamente as frestas através de soldaduras contínuas;
- Garantir drenagem de água nos elementos, evitar áreas estagnadas de deposição de impurezas, evitar arestas “vivas”;
- Inspeccionar e remover depósitos de forma periódica;
- Utilizar juntas não absorventes como o teflon.

Em aços inoxidáveis, a adição de alguns elementos têm diferentes efeitos na prevenção deste tipo de corrosão e são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Efeito na resistência por adição de elementos (Adaptado de [11])

Elemento	Efeito na resistência à picadas em aços inoxidáveis
Crômio (Cr)	Aumenta
Níquel (Ni)	Aumenta
Molibdênio (Mo)	Aumenta
Silício (Si)	Diminui (aumenta com Mo)
Titânio (Ti) e Nóbio (Nb)	Diminui em FeCl ₃ (não afeta com outros meios)
Enxofre (S) e Selênio (Se)	Diminui
Carbono (C)	Diminui (quando sensitizados)
Nitrogênio (N)	Aumenta

Em termos metalúrgicos, os metais formados a frio tendem à corrosão por picadas em alguns tipos de aços inoxidáveis. O tipo de acabamento da superfície também interfere neste tipo de ataque (superfícies polidas são menos suscetíveis que as mais irregulares).

3.1.5.3 - Corrosão por Frestas ou Crevice

Outro tipo de corrosão localizada é frequentemente encontrada em frestas e em áreas soldadas em superfícies de metais expostas a elementos corrosivos. Este tipo de ataque está normalmente associado a pequenos depósitos de solução estagnada, de materiais não metálicos como areia ou sujeira, ou mesmo depósitos de produtos de corrosão tendem a facilitar este tipo de corrosão.

O aço inoxidável é particularmente suscetível a este tipo de corrosão quando em contacto com soluções estagnadas localmente. Inicialmente, as reações ocorrem uniformemente até a diminuição da concentração de oxigênio no interior da fresta que induz a formação de uma pilha por arejamento diferencial, segundo a Reação (11) e Reação (5).

Após haver uma diminuição drástica nas reações de redução, a dissolução do metal continua provocando um aumento de cátions na solução, ativando a migração de cloretos na pequena fresta o que provoca um aumento na formação de cloretos metálicos que reagindo com a água formam hidróxidos insolúveis e ácido clorídrico como representa seguinte reação:



A presença de cloretos, e hidrogênio, aceleram a dissolução do metal ao que leva ao aumento rápido do processo numa zona muito localizada como apresentado na Figura 27.

Os métodos apresentados para a prevenção por corrosão em frestas é muito similar à corrosão por picadas apresentado anteriormente.

Os metais ou ligas dependentes de películas óxidas ou revestimentos protetores são particularmente suscetíveis a este tipo de ataque localizado devido as grandes concentrações de cloretos ou hidrogênio que as destroem.

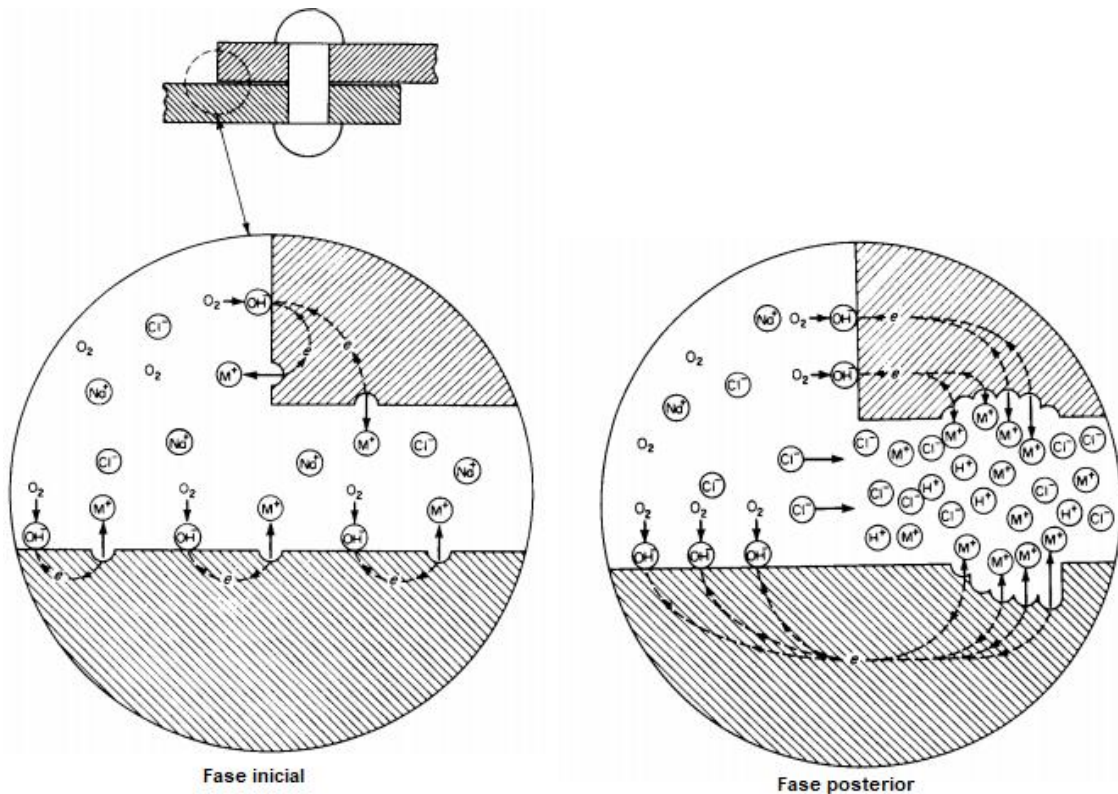


Figura 27 - Corrosão em frestas [11]

3.1.5.4 - Corrosão galvânica

Com uma diferença de potencial entre dois metais diferentes, leva a uma troca de elétrons entre estes, do mais reativo, para o menos reativo, provocando uma corrente elétrica. O metal mais reativo torna-se anódico e o outro catódico. O metal mais reativo, tem a tendência à corrosão enquanto o mais resistente não apresenta grandes sintomas de corrosão.

A Tabela 4 apresenta alguns dos metais da série galvânica, dos mais nobres aos mais reativos, em condições de equilíbrio em relação ao eletrodo padrão SHE.

O produto da corrosão é muito localizado, normalmente na união dos dois metais, havendo um decréscimo de corrosão com o aumento da distância (Figura 28).



Figura 28 - Corrosão galvânica

Tabela 4 - Série galvânica (Adaptado de [11])

	Elemento	Símbolo	E_0 (Volts)	
Nobres (catódicos)	Ouro	Au-Au ³⁺	+1,15	
	Platina	Pt-Pt ³⁺	+1,20	
	Prata	Ag-Ag ⁺	+0,80	
	↑	Mercúrio	Hg-Hg ₂ ²⁺	+0,79
	Cobre	Cu-Cu ²⁺	+0,34	
	Hidrogénio	H ₂ -H ⁺	0,00	
	Chumbo	Pb-Pb ²⁺	-0,13	
	Estanho	Sn-Sn ²⁺	-0,14	
	Níquel	Ni-Ni ²⁺	-0,25	
	Cobalto	Co-Co ²⁺	-0,28	
↓	Cádmio	Cd-Cd ²⁺	-0,40	
	Ferro	Fe-Fe ²⁺	-0,44	
	Crómio	Cr-Cr ³⁺	-0,74	
	Zinco	Zn-Zn ²⁺	-0,76	
	+ Reativos (anódicos)	Alumínio	Al-Al ³⁺	-1,66

A corrosão galvânica pode surgir nas seguintes formas:

- Pilha de ação local - é causada no mesmo metal por heterogeneidades existentes na sua composição química, textura ou tensões internas diferentes em zonas contíguas que desencadeiam o processo de corrosão eletrolítico. É um processo muito associado à corrosão uniforme;
- Pilha ativa-passiva - surge em metais com películas passivantes formadas pelo produto corrosivo. Em caso de dano superficial da película, a área afetada torna-se anódica e a relação de áreas é muito desigual o que leva a um ataque muito localizado;
- Pilha de concentração ou arejamento diferencial - surge quando o metal está exposto a diferentes concentrações de iões ou de oxigénio. A região onde se encontra a maior concentração tende a manter-se protegida e a de menor concentração sofre o efeito da corrosão.

Para reduzir o efeito da corrosão galvânica, podem ser tomadas algumas medidas de prevenção, tais como:

- Garantir uma relação de área favorável ($A_{anódica} \approx A_{catódica}$). Uma discrepância muito grande entre áreas provoca uma densidade de corrente elevada, levando a uma maior taxa de corrosão. Esse aumento da densidade de corrente deve-se ao facto do cátodo ter uma maior área para a reação de redução, obrigando ao ânodo a aumentar a reação de oxidação de forma a compensar. Em situações de área anódica muito inferior à catódica pode aumentar a taxa de corrosão 100 a 1000 vezes comparativamente a áreas equivalentes;
- Utilização de metais diferentes com aproximação na serie galvânica diminuem a diferença de potencial entre estes, diminuindo a intensidade debitada pelo ânodo;
- Isolar metais diferentes ou instalar um metal mais reativo (ânodo de sacrifício);
- Utilizar maior espessura no metal anódico leva a um maior tempo de vida útil;
- Adicionar inibidores ou reduzir ao máximo a presença do eletrólito;
- Aplicar revestimentos no cátodo, dificultando o acesso do oxigénio.

3.1.5.5 - Corrosão por erosão

A corrosão por erosão passa pelo ataque de um metal pelo movimento do fluido corrosivo sobre a superfície do metal. O movimento do fluido provoca efeitos de desgaste mecânico ou abrasão. O metal é parcialmente dissolvido e removido da superfície metálica ou pode, noutras situações, formar produtos de corrosão que são varridos com o movimento do fluido.

Vários tipos de meios corrosivos podem ser a causa deste ataque, incluindo gases, soluções aquosas, sistemas orgânicos e metais líquidos. Este tipo de corrosão aparenta um padrão direcional devido ao movimento do fluido corrosivo, ligeiras ondulações e furos arredondados (Figura 29).

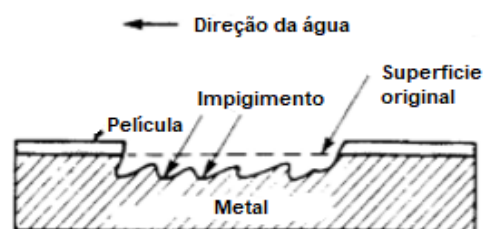


Figura 29 - Corrosão por erosão de um tubo [11]

Muitos metais e ligas são suscetíveis a este tipo de corrosão, independentemente do tipo de formação de película. Muitos dependem das películas protetoras para terem resistência. Nos casos do alumínio, chumbo e aço inoxidável são dependentes da película protetora para terem resistência à corrosão. Com o desgaste da película, o ataque é muito elevado.

A natureza e as propriedades da película protetora nos metais são essenciais na proteção contra a corrosão por erosão. Nestas películas à resistência ao desgaste, danos mecânicos e a capacidade de se renovarem são muito importantes na prevenção à corrosão por erosão.

A exposição do metal com a película danificada a velocidades elevadas de fluido influencia muito a corrosão por erosão devido a agitação do fluido (Figura 30).

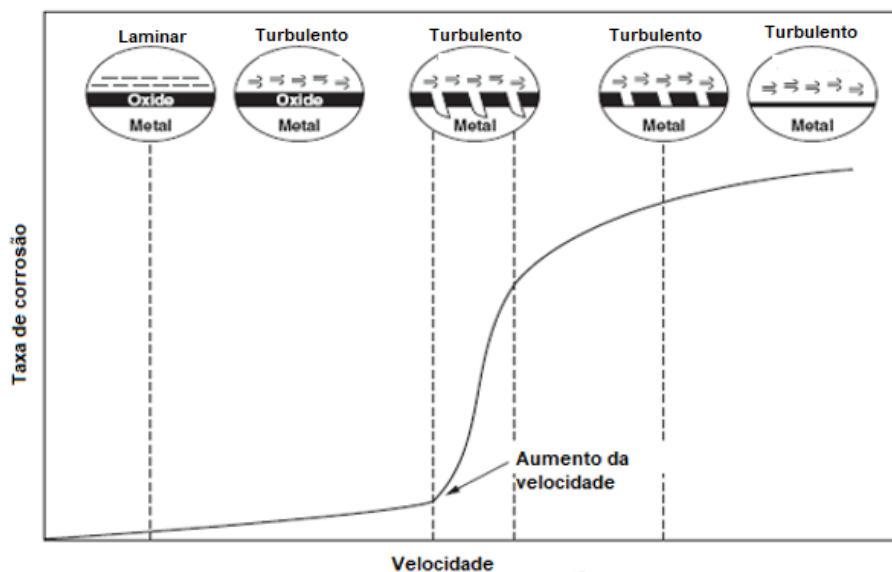


Figura 30 - Corrosão por erosão em função da velocidade de um líquido [14]

A corrosão por erosão pode ser influenciada pelo efeito galvânico. Em condições estáticas, o efeito galvânico pode ser lento dependendo da diferença de potencial associada, mas quando estão presentes metais diferentes e com o movimento do fluido corrosivo, as reações químicas aceleram levando a uma maior diferença de potencial entre os metais e conseqüente corrosão.

Cavitação

Outra forma particular de corrosão por erosão surge através do colapso de bolhas de vapor no líquido sob a superfície do metal. A elevada velocidade do fluido e mudanças de pressão provocam danos localizados em peças metálicas como turbinas e hélices de barcos (Figura 31).

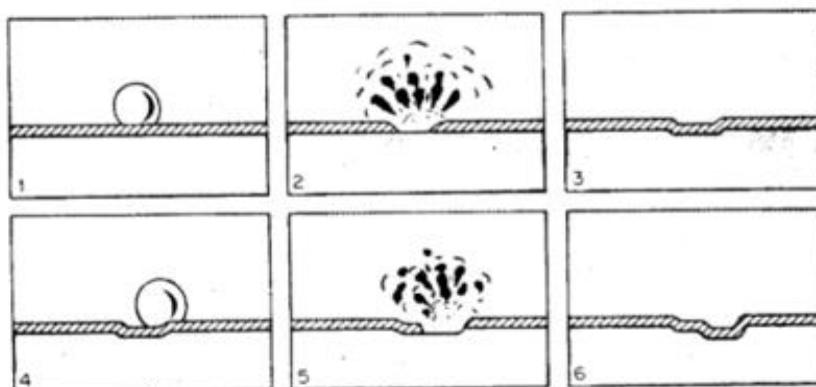


Figura 31 - Cavitação [11]

Corrosão por atrito

Em situações de materiais com áreas de contacto sob carga sujeitos a vibrações e escorregamento podem surgir produtos de corrosão devido à fricção e desgaste entre ligações (Figura 32). Esta forma particular de corrosão por erosão pode levar ao afrouxamento de ligações que podem provocar fraturas por fadiga e picadas nas zonas friccionadas levando à corrosão.

Podem ser minimizados os efeitos da corrosão por erosão através de:

- Utilização de materiais de melhor performance perante este tipo de corrosão tende a ser uma solução económica;
- Cuidados com a forma e geometria das peças metálicas que podem reduzir a velocidade do fluido e garantir um fluxo laminar, logo reduzindo o efeito da erosão;
- Adição de inibidores no metal são métodos eficazes mas pouco económico. O controlo da temperatura tanto neste tipo de corrosão como em qualquer outra é essencial;
- Aplicação de camadas protetoras que produzam uma barreira resiliente entre o metal e o fluido corrosivo;
- Proteções catódicas ajudam a reduzir o ataque em caso de haver metais diferentes (efeito galvânico), mas em termos de prevenção para outros meios de ataque, não é muito eficaz;
- Para situações de corrosão por atrito, de modo a reduzir a fricção, podem ser aplicados lubrificantes. Utilização de materiais mais resistentes nas zonas de contacto de metais levam a um menor desgaste. O aumento do atrito na zona de contacto através de superfícies mais rugosas podem diminuir o escorregamento ou utilizando peças substituíveis nas zonas de contacto como borracha pode diminuir a vibração.

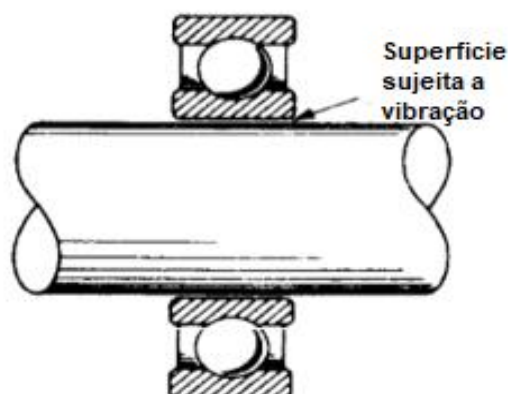


Figura 32 - Corrosão por atrito [11]

3.1.5.6 - Corrosão intergranular

Os efeitos deste tipo de corrosão devem-se aos limites dos grãos (fronteira), que em certas condições, podem ser muito reativos e provocam um ataque muito localizado no metal, o que leva à desintegração dos grãos e a perda de resistência por parte do metal.

A corrosão intergranular pode ser causada por impurezas dos limites dos grãos. Esta surge na superfície e ocorre devido a células locais entre o limite do grão e próprio grão em si pela diferença na composição nesses elementos que originam uma diferença de potencial.

A Figura 33 representa uma situação onde a difusão⁷ do carbono para as áreas entre grãos é facilitada pela sensibilização que leva à precipitação de carboneto crómio. As zonas onde houve redução de crómio (limites dos grãos) tornam-se de menor resistência havendo diferença entre as zonas metálicas, formando uma zona anódica no limite do grão e uma zona catódica na área entre grãos. Com uma relação de áreas desfavorável ($A_{\text{anódica}} \ll A_{\text{catódica}}$), uma taxa de corrosão elevada leva a um ataque no limite dos grãos enquanto que a área entre grãos não é afetada.

O processo metalúrgico do metal torna-se importante pelo facto dos tratamentos térmicos e trabalhos a frio afetarem o tamanho dos grãos, a sua composição, localização e quantidade. De uma maneira geral, as ligas metálicas estão mais suscetíveis a este tipo de corrosão. Um dos mais afetados por este tipo de corrosão são os aços inoxidáveis austeníticos quando aquecidos entre 510-790°C, tornam-se sensibilizados⁸ ou suscetíveis à corrosão intergranular. Este fenómeno deve-se ao empobrecimento de crómio entre grãos pela precipitação⁹ de carbonetos, levando à insuficiência de crómio nessa área, reduzindo a sua resistência à corrosão. O carboneto (Cr_{23}C_6), não sofre corrosão enquanto a zona entre grãos onde houve a redução de crómio fica suscetível à corrosão.

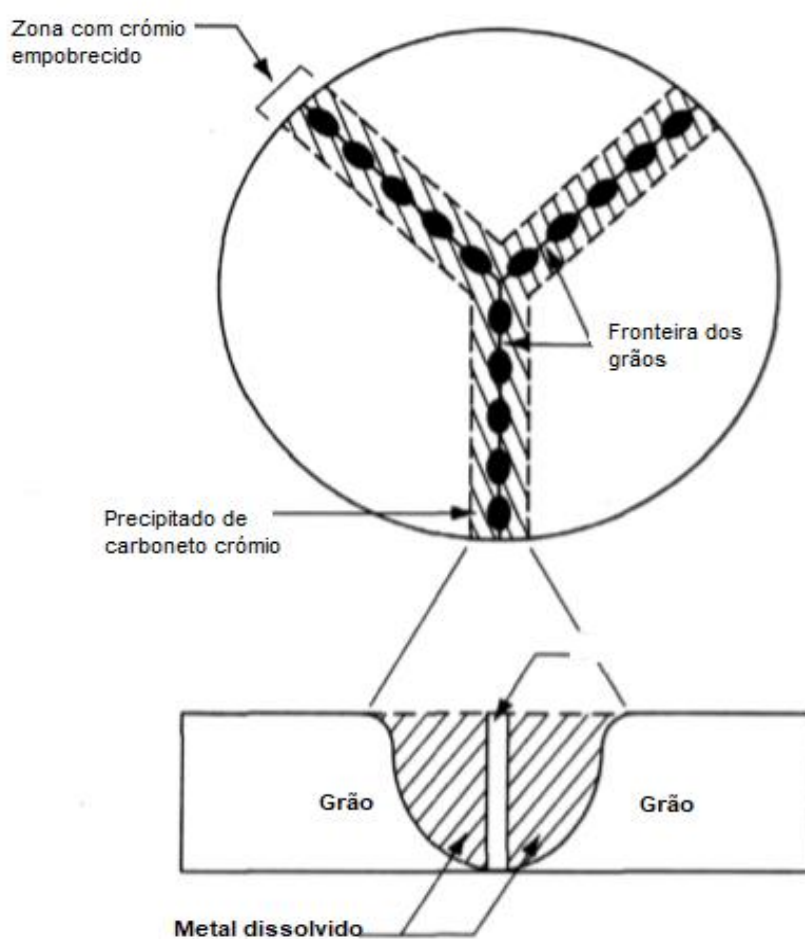


Figura 33 - Aço inoxidável sensibilizado tipo 304 [11]

⁷ Fenómeno de transporte pelo movimento das moléculas de um fluido

⁸ Baseia-se na precipitação de carbonetos nos contornos do grão com o aumento da temperatura

⁹ Formação de um sólido durante uma reação química

Existem 2 formas de minimização deste tipo de ataque em aços inoxidáveis:

- Tratamento térmico entre 1060-1120°C com arrefecimento rápido através de uma solução líquida. O carboneto de cromo é dissolvido nestas temperaturas, obtendo-se uma liga mais homogênea. Em casos de soldadura, deve-se tornar o arrefecimento rápido de modo a não fragilizar a zona afetada pelo calor;
- Diminuir o teor de carbono abaixo de 0.03% torna difícil a formação de carbonetos

Fragilização por soldadura (*Weld decay*)

Algumas falhas surgem em aços inoxidáveis devidas as soldaduras através desta forma de corrosão. O aquecimento do aço por efeito do aumento da temperatura através da soldadura leva à sensitização, afetando uma faixa lateral à soldadura que em alguns meios pode levar a separação do grão do próprio metal. Este fenómeno depende da temperatura atingida e do tempo a que o metal está sujeito ao calor (Figura 34).

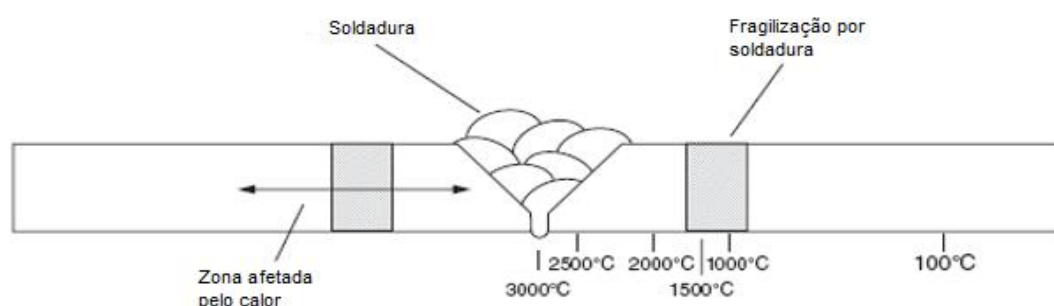


Figura 34 - *Weld decay* [14]

Nas proteções anticorrosivas por sistemas de pintura são usualmente aplicadas demãos extras de produto nas zonas afetadas pelas soldaduras de forma a garantir maior proteção. Esta demão extra é chamada de "*stripe coat*" ou simplesmente "*striping*".

3.1.5.7 - Corrosão por lixiviação seletiva

Consiste na remoção do elemento de liga menos nobre (mais anódico), por processos de corrosão. O exemplo mais comum é a remoção do zinco (Zn) dos latões¹⁰ (perda de Zn em ligas Cu-Zn), chamado deszincificação.

Deszincificação

Este tipo de corrosão pode surgir de forma uniforme ou localizada, apesar de não existirem variações dimensionais significativas. A corrosão uniforme aparece em latões de alto teor de zinco sujeito a ambientes ácidos, enquanto a corrosão localizada aparece em latões de baixo teor em zinco em ambientes alcalinos.

O mecanismo para a deszincificação é baseado em três condições:

- A dissolução do latão (essencialmente o zinco);
- Iões de zinco presentes na solução;
- A redução do cobre.

¹⁰ Latão é uma liga metálica de cobre e zinco

O zinco é mais reativo que o cobre. A redução do cobre é possível com a água por hidrogénio gasoso e iões de hidróxido e ocorre oxidação do zinco. Logo, até é possível acontecer deszincificação sem acesso ao oxigénio. Com o acesso ao oxigénio na reação catódica, há um aumento significativo na deszincificação.

A deszincificação pode ser minimizada reduzindo a agressividade do ambiente (por exemplo, suprimindo o acesso do oxigénio), ou através de proteção catódica. Infelizmente, estes métodos não são económicos e em casos correntes, são utilizadas ligas menos suscetíveis como o latão vermelho (15% Zn), que é quase imune ao fenómeno. Bons resultados também podem ser obtidos através da adição de inibidores como fósforo (P), arsénio (As) ou antimónio (Sb).

Grafitização

Costuma surgir nos ferros fundidos cinzentos através de perda da matriz do ferro, ficando a rede de grafite já presente que é catódica em relação ao ferro surgindo células galvânicas. Esta situação leva a perda de resistência mecânica o que pode levar a situações perigosas. O produto da corrosão tem um aspeto superficial apesar do metal já ter perdido resistência. É um processo lento e não ocorre em ferros fundidos dúcteis, maleáveis ou brancos, porque a rede de grafite não é contínua.

3.1.5.8 - Corrosão sob tensão

Forças mecânicas (tração ou compressão) normalmente têm pouca influência na corrosão em geral. Forças de compressão até podem reduzir a suscetibilidade do metal fraturar. No entanto, a combinação de tensões, em meios corrosivos é um fator a ter em conta em estruturas metálicas.

Corrosão sob tensão é um processo mecânico e químico que leva a fraturas de algumas ligas abaixo da sua tensão de rotura. Uma liga suscetível associada a um ambiente químico corrosivo, em situação tensão (tração) constante são elementos fulcrais para este tipo de ataque.

As fraturas provocadas pela corrosão sob tensão surgem em 2 tipos:

- Intergranular – segue através da área entre grãos;
- Transgranular – segue através do grão.

Ocasionalmente pode suceder ambos os casos e a fratura tende a surgir numa direção normal à tensão aplicada. As tensões podem ser residuais, tensões aplicadas, por temperatura ou soldadura, até mesmo uma combinação parcial ou total das tensões, desde que sejam de tração.

Aços inoxidáveis são muito suscetíveis a este tipo de fratura quando sujeitos a iões de cloretos mesmo em concentrações muito baixas, por proporcionarem uma corrosão localizada e fraturas por corrosão sob tensão. O termo “aço inoxidável” é por vezes, interpretado de uma forma muito literal o que porventura pode levar a consequências desastrosas (Figura 35).

Apesar da corrosão sob tensão ser o causador de muitos problemas relacionados com estruturas metálicas, o mecanismo ainda não foi inteiramente compreendido, devendo-se à complexa interação metal/ interface/ ambiente corrosivo. Sabe-se que a corrosão está presente na iniciação das fraturas, através de uma picada, falha ou outra descontinuidade na superfície do metal que provocam o aumento da tensão. A tensão aumenta consideravelmente na ponta da descontinuidade à medida que o raio desta diminui. As fraturas são usualmente observadas em zonas de picadas (*pitting*). No início da fratura, a ponta mais avançada tem o raio menor, logo maior tensão aplicada, levando à propagação.

O aço inoxidável surge como um aço muito afetado por este ataque, pois a tensão na ponta da fratura danifica a película protetora levando a mais corrosão em vários pontos da superfície e facilitam a propagação tanto da fratura como da corrosão (através da corrosão intergranular ou mesmo *pitting*).

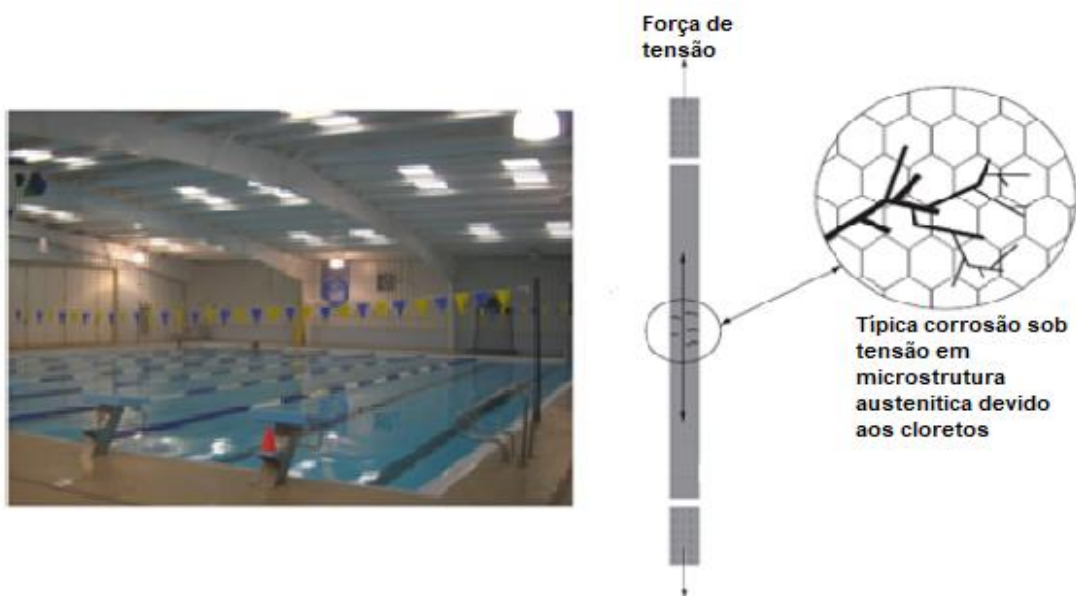


Figura 35 - Estrutura tipicamente sujeita a cloretos (esquerda), corrosão sob tensão (direita) [15]

Para prevenção deste tipo de corrosão, por ser de difícil compreensão, sua aplicação é muito generalizada ou empírica. Ficam algumas formas de como minimizar a tensão e consequente corrosão:

- Baixar a tensão abaixo de um patamar de risco (se este existe). As tensões residuais de alguns metais podem ser reduzidas por arrefecimento controlado. Aumentar a secção ou reduzir a carga;
- Evitar ambientes muito corrosivos;
- Mudar a liga metálica se ambas anteriores não forem possíveis. O aumento de níquel em aços inoxidáveis permite resultados satisfatórios. O aço carbono é mais suscetível à corrosão uniforme e menor suscetibilidade as fraturas por corrosão sob tensão;
- Utilização de proteção catódica através de corrente elétrica imposta pode ser uma solução apenas em casos em que haja conhecimento de a estrutura poder sofrer de fratura sob tensão. Isto deve-se ao fato dos efeitos da fragilização por hidrogénio serem acelerados por corrente introduzida através de proteções catódicas;
- Revestimentos no metal podem ser utilizados. Estes tendem a manter o metal relativamente isolado do ambiente de exposição.

3.1.5.9 - Ataque por hidrogénio

Apesar de não ser considerada como uma forma de corrosão, está frequentemente ocorre indiretamente através da corrosão, o que a definiu ser de interesse na apresentação dos tipos de corrosão. Define-se como danos mecânicos do metal causados pela presença ou interação do metal com o hidrogénio. O hidrogénio atómico (H) é o único elemento com capacidade de difusão através dos metais. A forma molecular do hidrogénio (H₂), não tem essa capacidade. Logo, o hidrogénio atómico é o elemento que favorece os danos por hidrogénio. Estes podem surgir de atmosferas de alta temperatura, processos de corrosão e eletrólise. A redução dos iões de hidrogénio envolve a produção de átomos de hidrogénio e consequentemente, moléculas de hidrogénio, como se pode verificar pelas reações químicas Reação (7) e Reação (5).

A presença de alguns elementos tais como enxofre (S), fósforo (P), e arsénio (As), tendem a diminuir a redução dos iões de hidrogénio, através da diminuição da capacidade para formar moléculas (H₂), provocando uma maior concentração de hidrogénio atómico na superfície do metal.

Este tipo de ataque surge nas formas:

Empolamento por hidrogénio

Através de reações de redução produz-se hidrogénio atómico origina moléculas de hidrogénio. Em situações em que não é propícia a formação de moléculas, a concentração de átomos de hidrogénio aumenta levando à difusão deste para o interior do metal. Quando estes encontram um vazio, recombina-se formando moléculas (Figura 36). Como as moléculas de hidrogénio não têm a capacidade de difusão, permanecem no vazio aumentando a pressão do gás no seu interior. Sendo a pressão de equilíbrio entre hidrogénio molecular e o atómico na ordem de vários Megapascals (Mpa), o que pode levar à rutura do material.

De modo a evitar o empolamento, podem ser adotados alguns cuidados, tais como:

- Usar metais livres de vazios;
- Utilização de revestimentos resistentes à penetração do hidrogénio;
- Utilização de inibidores reduzem o empolamento pois estes diminuem a redução do hidrogénio;
- Utilizar ligas de níquel pois a difusão do hidrogénio nestes elementos é muito baixa.

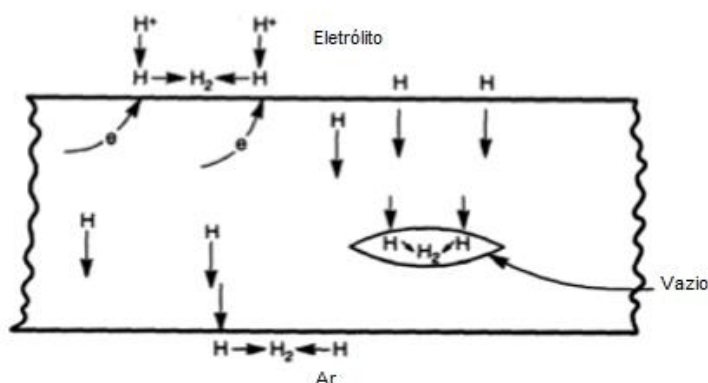


Figura 36 - Empolamento hidrogénio [11]

Fragilização por hidrogénio

O mecanismo exato é de difícil previsão mas, a fase inicial é a mesma do empolamento por hidrogénio. As tentativas para explicar este fenómeno baseia-se na interferência em superfícies de escorregamento por hidrogénio dissolvido. Estas superfícies podem ter origem em pequenos vazios através da acumulação do hidrogénio. Existe uma distinção entre este fenómeno e fratura por corrosão sob tensão pela interação da corrente elétrica. Casos em que a corrente torna o metal mais anódico com o processo de dissolução anódica a contribuir para a fracturação, é considerado fratura por corrosão sob tensão. Nos casos onde a fratura é acentuada por corrente na direção oposta que favorecem a redução do hidrogénio, é considerado fragilização por hidrogénio (Figura 37).

A fragilização por hidrogénio pode ser diminuída por:

- A Redução da taxa de corrosão que leva a uma menor produção de hidrogénio atómico livre para a difusão;
- Cozeduras a temperaturas baixas (90 a 150°C) facilita a remoção do hidrogénio presente no metal;
- Em ligas de alta resistência, a adição de níquel e molibdénio reduz a fragilidade ao hidrogénio;
- Em metais propícios à fragilização por hidrogénio, é aconselhável a utilização de eléctrodos pobres em hidrogénio para a soldadura. Durante a soldadura, deve-se evitar a água e vapores pois são uma fonte rica em hidrogénio.

Descarbonização

A uma temperatura elevada o hidrogénio pode influenciar as propriedades dos metais de várias formas. Em ligas reforçadas por carbono, a reação com o hidrogénio a altas temperaturas leva à perda dos carbonetos precipitados diminuindo a sua resistência e aumentando a sua ductilidade.

Sulfidação

Gases redutores que contêm hidrogénio como hidróxido de enxofre (H_2S) podem estar presentes em reações catódicas. Também podem acontecer reações anódicas com a precipitação de sulfuretos que tendem a levar à formação de uma película imperfeita e em algumas ligas. Também as propriedades mecânicas ficam comprometidas com a condensação de compostos de enxofre [11;12;14].

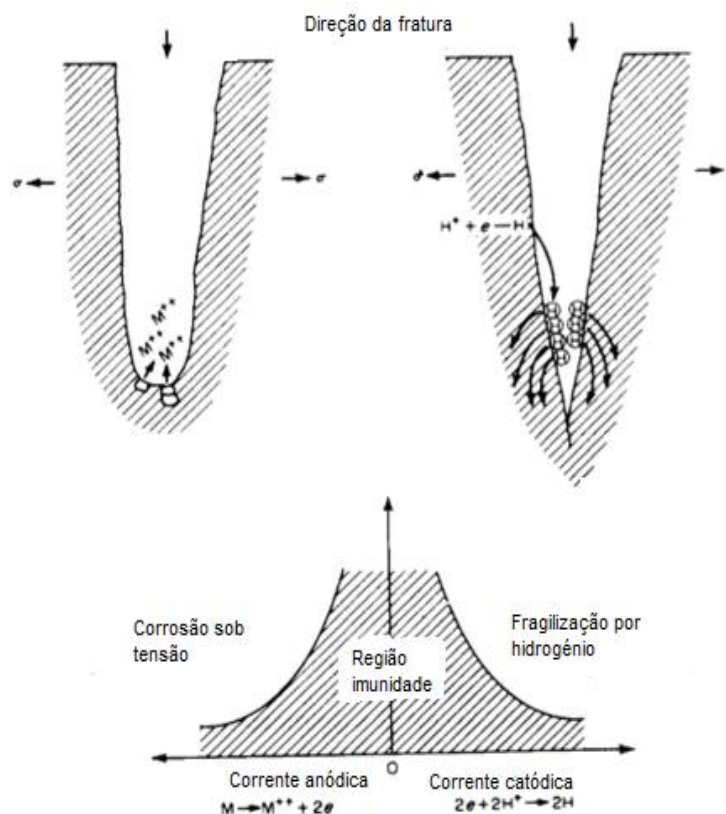


Figura 37 - Fratura por corrosão sob tensão/fragilização por hidrogénio [11]

3.2 - Fatores de influência na corrosão

Ainda sobre a corrosão importa dar a conhecer os fatores que potenciam este fenómeno que danifica e degrada esteticamente os metais que constituem muitas das estruturas presentes no nosso quotidiano.

3.2.1 - Corrosão atmosférica

A corrosão atmosférica tem o maior contributo para os tipos de corrosão apresentados. A humidade e o oxigénio têm grande contributo na corrosão, mas contaminantes como compostos do enxofre (S) e composto do cloro (Cl) como o cloreto de sódio (NaCl), facilitam de forma acentuada a corrosão. Estima-se que a corrosão em aços junto à costa seja 400 a 500 vezes mais elevada que em áreas no deserto.

Da mesma forma estima-se que a cerca de 30 metros da costa, a corrosão seja 12 vezes mais rápida que a 300 metros da costa.

3.2.1.1 - Atmosferas exteriores

A corrosividade do ambiente de exposição é um fator a ter em conta na conceção e manutenção de uma estrutura metálica. Muitos dos parâmetros usados para descrever os fenómenos associados com atmosferas exteriores dependem do clima e de variáveis como velocidade do vento, precipitação, nível de poluição, humidade, transporte por aerossóis.

Um esquema de classificação de atmosferas exteriores foi desenvolvido pela *International Standard Organization* (ISO), e é o mais utilizado em termos de classificação de ambientes de exposição (Tabela 5). O esquema foi elaborado com a exposição de cinco tipos de metal diferentes em 51 locais em 14 países diferentes durante vários anos. As cinco categorias traduzem de forma aproximada, ambientes de exposição Ci em forma crescente em grau definidos como muito baixa, baixa, média, alta, muito alta industrial e marinha.

Na Figura 38 é apresentado o mapa para a classificação das atmosferas para Portugal continental segundo a EN NP ISO 9223.

Tabela 5 - Classificação dos ambientes corrosivos (Adaptado de [16])

Categorias de corrosividade	Exemplos de ambientes típicos em climas temperados	
	Exterior	Interior
C1 (Muito baixa)	-	Edifícios aquecidos, com atmosferas limpas, i.e., escritórios, lojas, escolas, hotéis
C2 (Baixa)	Atmosfera com baixo nível de poluição. Principalmente áreas rurais	Edifícios não aquecidos onde a condensação pode ocorrer, i.e., depósitos, pavilhões desportivos
C3 (Média)	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada de SO ₂ , Áreas costeiras com baixa salinidade	Zonas de produção com alta humidade e alguma poluição, i.e., instalações de processamento de alimentos, lavandarias, fábricas de cerveja e laticínios
C4 (Alta)	Áreas industriais e áreas costeiras com elevada salinidade	Indústrias químicas, piscinas, estaleiros navais
C5 (Muito alta - Industrial)	Áreas industriais com alta humidade e atmosfera agressiva	Edifício e áreas com condensação quase permanente e com alta poluição
C5 (Muito alta - Marinha)	Áreas costeiras e "offshore" com alta salinidade	Edifício e áreas com condensação quase permanente e com alta poluição

3.2.1.2 - Atmosferas interiores

Ambientes interiores normais são considerados menos corrosivos quando a humidade e outros componentes corrosivos estão em parâmetros baixos. No entanto, algumas combinações podem causar elevada corrosão mesmo sem a presença de um agente poluente. A condensação num metal frio pode simular a imersão constante de parte da superfície metálica que podem facilitar diversos tipos de corrosão. Situações deste tipo são constantes em áreas confinadas, perto ou ao nível do solo, até mesmo em zonas abaixo do solo como caves onde prevalecem elevados teores de humidade.

Em termos de gases reativos, em condições normais, estes têm pouca atividade na corrosão em ambientes interiores pois a sua interação é curta e por vezes acabam por serem absorvidos pelas superfícies.



Figura 38 - Categorias de corrosividade em Portugal continental (Adaptado de [15])

3.2.1.3 - Fatores que influenciam a corrosão atmosférica

Como já apontado, muitos fatores que impelem a corrosão atmosférica devem-se ao clima ou a fatores meteorológicos. Temperatura, humidade relativa, velocidade e direção do vento são fatores a considerar.

Temperatura

A temperatura tem um papel importante na corrosão atmosférica. É estimado que a atividade corrosiva duplique a cada aumento de 10°C de temperatura. Um outro efeito surge com a diferença de temperatura entre a superfície metálica e o ambiente circundante onde a criação de humidade no metal pode levar a reações anódicas.

Humidade relativa, ponto de orvalho e tempo de molhagem

A humidade tem um papel importante na corrosão atmosférica, seja em forma de precipitação, condensação ou humidade elevada. Sem a presença da humidade, muitos dos contaminantes teriam pouco efeito corrosivo. Com teores de humidade elevados, a formação de um eletrólito torna-se possível nas superfícies metálicas e elevadas concentrações de contaminantes podem ser atingidas principalmente em ciclos de secagem e molhagem.

Na presença de um eletrólito, reações anódicas e catódicas surgem (Figura 39). Com as reações anódicas tendo efeito corrosivo e as catódicas com possível redução do oxigénio, como descrito na Reação (4) e Reação (5).

A humidade relativa define-se como a razão entre o vapor de água presente com a quantidade máxima de vapor de água que a atmosfera pode suportar a uma determinada temperatura e é expressa em percentagem. Na ausência de superfícies onde possam ocorrer condensações, o ponto de orvalho corresponde à temperatura a qual a condensação ocorre. Logo, a humidade relativa elevada está associada a ponto de orvalho próximo da temperatura ambiente como consegue-se ver na Figura 40.

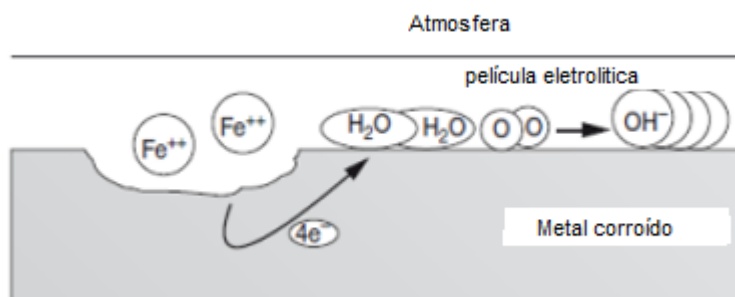


Figura 39 - Esquema de corrosão atmosférica no ferro [14]

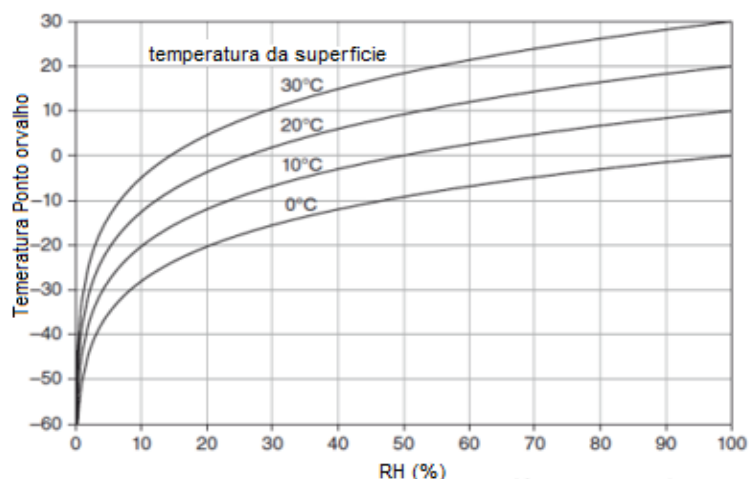


Figura 40 - Relação entre ponto de orvalho/humidade relativa [14]

A humidade crítica pelo qual não deveria surgir corrosão adicional através do fenómeno depende da natureza do metal, da tendência dos produtos de corrosão de absorverem humidade e a presença de poluentes. Ensaio mostram que para o aço, humidade relativa de 60% livre de poluentes é um ponto crítico. Em ambientes marinhos, a taxa de humidade tende a ser elevada (> 60%), e sais higroscópicos como cloreto de sódio (NaCl) são abundantes o que levam a retenção de mais humidade e demonstram o porquê da gravidade deste tipo de ambiente.

O tempo de molhagem acaba por ser outro parâmetro de medição através da humidade relativa, pois considera-se que uma superfície está molhada quando a humidade relativa é superior a 80% em temperaturas superiores a 0°C. Em casos dos ambientes marinhos referido anteriormente, com a presença de sais higroscópicos, a noção da agressividade do ambiente é notória.

Partículas de aerossóis

Estas partículas estão presentes por todo o lado. A sua concentração depende de vários fatores como hora do dia, local, altura do ano, condições atmosféricas, altitude e velocidade do vento. Os aerossóis podem ser introduzidos na atmosfera por processos físicos ou químicos. O caso de aerossóis de cloretos com origem marinha e poeira levantada pelo vento são considerados primários, enquanto reações e condensações de gases atmosféricos são considerados secundários.

As maiores concentrações encontram-se nas zonas urbanas onde podem ter variados tamanhos desde 0.001 a 100µm de diâmetro. As partículas são de pequeno tamanho e ficam à mercê da velocidade do vento, da gravidade e da inclusão em gotas.

Estudos comprovam que a migração de aerossóis marinhos para terra com dimensões consideráveis (> 10µm) tendem a ficar entre 400 a 600m da costa devido a forças da gravidade. A deposição do sal na superfície dos metais tende a contribuir de forma ativa para a corrosão.

Dióxido de enxofre (SO₂), produto da queima de combustíveis fósseis foi identificado como um dos aerossóis com maior contribuição na corrosão em zonas urbanas e industriais. Óxidos de nitrogênio (NO_x) também produto de combustíveis fósseis, dióxido de enxofre e partículas de aerossóis podem reagir com a humidade do ar e a luz ultra violeta e formar novos químicos e serem transportados como aerossóis. Um bom exemplo disso é a neblina ou *smog* que pairam nas grandes cidades.

3.2.2 - Corrosão em água

A água não é de todo um fator prejudicial para os metais. Em algumas situações até pode ser benéfica. Em caso de chuva, a água que cai sobre a superfície metálica pode retirar poluentes atmosféricos depositados ou cloretos, até mesmo retirar produtos de corrosão dependendo da solubilidade do produto. Por outro lado, a água causa muitos danos por corrosão em tubagens e máquinas que funcionam em função desta.

Existem diversos tipos de água e cada tem um comportamento singular na corrosão.

3.2.2.1 - Água do mar

Água do mar contém cerca de 3% de sal e é ligeiramente alcalina (pH 8). Tem a característica de ser um bom eletrólito e tende a causar corrosão galvânica e crevice. A corrosão é impelida pela quantidade de oxigênio, a velocidade, temperatura, presença de organismos biológicos, salinidade entre outros.

Salinidade

A salinidade é um fator a ter em conta pela sua condutividade e a facilidade de penetração dos cloretos. A quantidade de cloretos disponíveis, o oxigênio e a temperatura influenciam a taxa de corrosão e com percentagens de 3.5% produz possivelmente a solução de cloretos mais corrosiva (Figura 41).

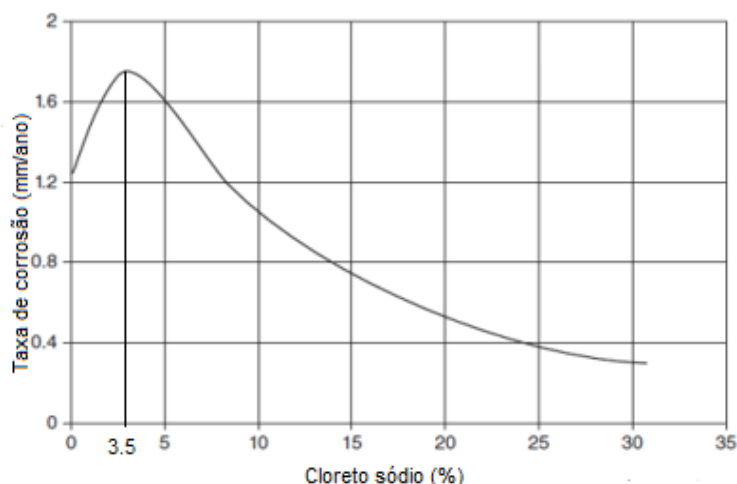


Figura 41 - Corrosão em aço em várias soluções de NaCl [14]

Quantidade de oxigênio

A quantidade de oxigênio na água do mar depende de fatores como a salinidade e a temperatura. Muito do oxigênio surge de bolhas de ar na rebentação, no entanto, por processos biológicos de fotossíntese principalmente na primavera, a concentração de oxigênio tende a disparar.

Áreas de rebentação com ciclos de molhagem e secagem são muito suscetíveis à corrosão pela presença de oxigênio dissolvido na água pois este funciona como polarizador anódico acelerando o fenómeno da corrosão (Figura 42).

3.2.2.2 - Água salobra

Geralmente contém entre 0.1 e 2.5% de sal sejam de depósitos naturais ou por diluição de água do mar. Esta está presente nos estuários de rios, portos, zonas de encontro de águas e tem um comportamento ligeiramente diferente relativamente à corrosão pois a diminuição na concentração de sal leva também à diminuição de condutividade, variação de oxigênio dissolvido e os compostos orgânicos tendem a aumentar tal como as incrustações biológicas (*fouling*). Nos portos, estuários e baías, podem haver diferentes tipos de incrustações (Figura 43) pois esta depende da salinidade, grau de poluição e prevalência de impurezas.

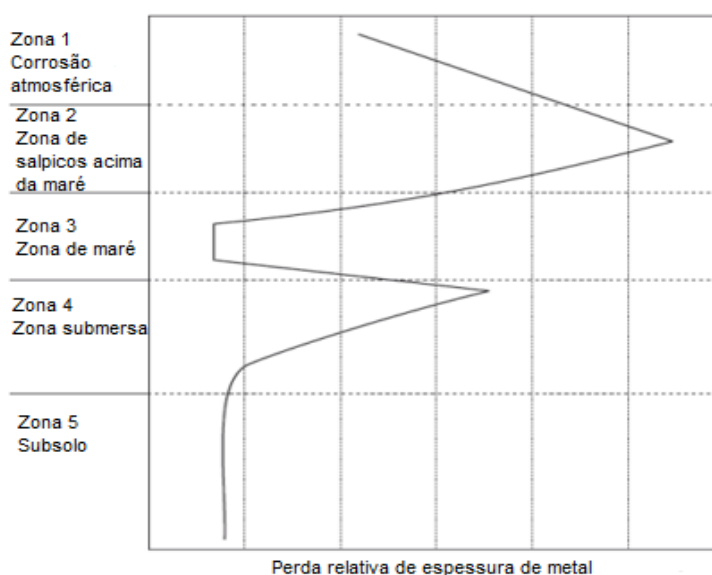


Figura 42 - Perfil de corrosão de aço em água do mar [14]



Figura 43 - Provete aço sujeito a incrustações

3.2.2.3 - Águas naturais

Têm muitas variações nas características físicas químicas e biológicas ao longo do ano. O oxigênio, nutrientes, pH e outros fatores importantes para a incrustação e corrosão são relativamente conhecidos. Muitos tipos de metais tendem para a corrosão em contato com estas águas. O ataque depende de elementos que podem estar contidos na água facilitando os mecanismos de corrosão. As águas podem ter origem na superfície ou subterrânea, e normalmente contém menos 0.1% de cloreto de sódio (NaCl). Podem ser consideradas duras ou moles dependendo da quantidade de cálcio e sais de magnésio. As águas subterrâneas diferem das águas superficiais em termos de quantidade de minerais dissolvidos, temperatura e ausência de partículas suspensas. Importa salientar que águas moles são mais corrosivas que as duras. As águas duras depositam carbonatos na superfície do metal que pode protegê-lo da corrosão [11;14;15;16].

3.2.3 - Corrosão em solos

Corrosão em solos depende do contacto do solo com o metal e outras variáveis que se alteram facilmente com a profundidade e composição do mesmo. Existem 3 categorias de corrosividade para águas e solos definidas na norma EN ISO 12944-2 apresentado na Tabela 6:

Tabela 6 - Categorias de corrosividade para águas e solos [16]

Categoria	Ambiente	Exemplos de ambientes e estruturas
Im1	Água doce	Instalações de rio, centrais hidroelétricas
Im2	Água do mar ou salobra	Áreas portuárias com estruturas tais como portas de comportas, diques, quebra-mares, estruturas de plataforma
Im3	Solo	Tanques enterrados, condutas de aço e vigas de aço

3.2.3.1 - Parâmetros do solo que afetam a corrosividade

Vários tipos de elementos estruturais metálicos são afetados desde que em contacto com solo. Tanques de água e gás, tubagens de transporte de fluidos, fundações, etc. são usualmente afetados quando o seu bom funcionamento é esperado durante muito tempo.

O solo é um ambiente complexo onde os parâmetros fundamentais para corrosão podem variar em pouca distância, criando múltiplas células de corrosão na mesma estrutura. Vários parâmetros surgem como causadores de complexos processos que levam à corrosão (Figura 44).

Tipos de solo

Vários tipos de solo podem ser encontrados de granulometrias diferentes, variando na quantidade de matéria orgânica, quantidade de água e gases.

Água

A água constitui o eletrólito que suporta as reações eletroquímicas da corrosão seja em solos saturados ou não. O nível freático é o limite onde o solo tende a estar saturado. O movimento da água pode ocorrer contra a gravidade por capilaridade, o que dá diferentes teores de humidade dependendo da profundidade. A capacidade de retenção de água depende da sua granulometria e porosidade.

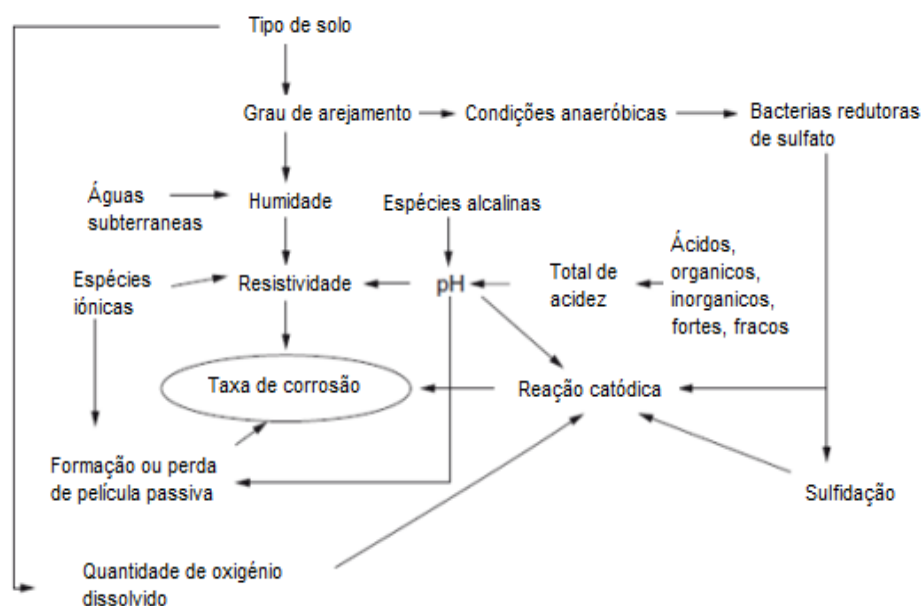


Figura 44 - Parâmetros de solo que afetam a corrosão [14]

Grau de arejamento

A concentração de oxigênio tende a diminuir com a profundidade. Em solos neutros e alcalinos a concentração de oxigênio tem um papel importante na taxa de corrosão pela sua participação nas reações catódicas. Contudo, na presença de certos micróbios como bactérias de redução de sulfatos, a taxa de corrosão pode ser muito elevada, mesmo em situações anaeróbicas. A circulação do oxigênio é mais fácil em solos de granulometria maior que em solos mais finos. Escavações aumentam a quantidade de oxigênio no solo, sendo os solos alterados mais ricos em oxigênio onde a taxa de corrosão é mais elevada relativamente a solos não alterados.

pH

O pH dos solos varia entre 5 e 8. Solos ácidos encontrados em zonas industriais devido a chuvas ácidas e certas formas de atividade microbiana representam sério risco a estruturas enterradas de aço, ferro fundido e metais com revestimentos em zinco devido à corrosão. Por outro lado, solos alcalinos que são ricos em sódio, potássio, magnésio e cálcio, podem formar depósitos calcários protetores em estruturas enterradas como observada na Figura 45.



Figura 45 - Aço galvanizado enterrado em zona industrial

Resistividade do solo

Tende a ser um indicador de corrosividade dos solos pois quanto maior for a resistividade, menor será a intensidade de corrente a circular, diminuindo as reações da corrosão. A resistividade tende a diminuir com o aumento do teor em água e concentração de espécies iônicas. Porém, não é o único parâmetro que afeta a corrosão, logo, assumir que alta resistividade no solo garante a ausência de corrosão é um erro. As variações no solo são muito frequentes e em zonas onde o solo tem alta resistividade próxima de zonas com baixa resistividade, podem surgir macrocélulas de corrosão.

Cloretos

Este facilita as reações locais de dissolução de muitos metais e sua presença tende a diminuir a resistividade do solo.

Sulfatos

Os sulfatos não são considerados tão nocivos como os cloretos. Todavia, estruturas de betão armado podem ser afetadas quando sujeitas a níveis elevados de sulfatos. Estes também são nocivos na presença de bactérias de redução de sulfatos que nutrem-se destes iões convertendo-se em sulfuretos altamente corrosivos [14;16].

3.2.4 - Corrosão biológica

A atividade biológica de organismos vivos pode afetar de forma direta ou indireta os mecanismos de corrosão. Estes organismos vivos existem sob a forma micro (bactérias), ou macro (algas, fungos etc).

3.2.4.1 - Microrganismos

Microrganismos tendem a incrustar-se em superfícies sólidas, a colonizar e proliferar formando biofilmes, produzindo um ambiente na interface do metal diferente do que este está inserido. O biofilme não costuma ser uniforme o que em zonas pode ser protetivo e em outras provocar o ataque localizado como *pitting*.

3.2.4.2 - Macrorganismos

As algas e fungos são organismos que produzem ácidos orgânicos que induzem a corrosão. Os fungos podem produzir pontos anaeróbicos onde bactérias de redução de sulfatos associados a sulfuretos altamente corrosivos.

3.2.5 - Corrosão química

Muitos produtos químicos, orgânicos e inorgânicos são utilizados em setores industriais que utilizam processos químicos, petroquímicos, nucleares, etc. Em termos químicos, já foi referido anteriormente sobre o quão nocivo os químicos e os ácidos são para os metais de uma perspectiva externa. Numa perspectiva interna, muitos metais usados por exemplo na indústria petroquímica como tubagens, tanques e outros, que estão sujeitos a fenómenos de corrosão no seu interior e provocam problemas de funcionalidade como fugas, produtos de corrosão em circulação com o produto base e atrito no interior de tubos. Alguns destes problemas também são usuais em redes de água onde a contaminação, o cheiro e sabor entre muitos outros podem ser alterados dos parâmetros desejados.

Muitos destes problemas provêm da mesma forma de outros de perspectiva exterior, por exemplo pela presença de água, atividade biológica, pH, temperatura, velocidade, presença de oxigénio, etc. Logo, a parte interna também tem de ser sujeita a algum tipo de prevenção ou tratamento de modo a evitar problemas.

3.2.6 - Solubilidade dos produtos de corrosão

Os produtos da corrosão podem ser solúveis ou insolúveis. Os solúveis tendem a aumentar a taxa de corrosão pela condutividade do eletrólito e por terem capacidade higroscópica viabilizando a formação de soluções em taxas de humidade elevadas. Também são mais facilmente removíveis em caso de terem alguma capacidade protetora. Os produtos insolúveis tendem a proteger o metal funcionando como barreira e são mais difíceis de remover [14;19].

4

PREVENÇÃO E PROTEÇÃO PARA METAIS

Atualmente existem muitos sistemas e modos de proteger ou minimizar a ação da corrosão nos metais. Todas essas proteções surgiram de alguma forma para resguardar as estruturas, garantindo boas condições no tempo de serviço destas principalmente nos setores industriais. Seguidamente são apontadas algumas das mais usuais.

4.1 - Inibidores de corrosão

Os inibidores de corrosão são químicos que abrandam os processos de corrosão. São utilizados em pequenas porções nos ácidos, águas de arrefecimento, vapor e outros ambientes seja de forma continuada ou intermitente. Misturas de inibidores são normalmente usados comercialmente para melhorar a performance do metal relativamente à corrosão. Alguns inibidores retardam a corrosão formando uma fina película por adsorção. Outros formam precipitados mais volumosos que protegem o metal.

A eficiência dos inibidores é muito difícil de prever pela complexidade de interação entre os próprios inibidores e o ambiente. Um dos modelos estudados foca-se numa taxa de corrosão constante o que nem sempre é apropriado, pois em casos complexos de corrosão, outros tipos podem surgir como o *pitting* e corrosão sob tensão que são mais localizados e de difícil previsão. Em casos de corrosão uniforme, o modelo dá uma boa aproximação da taxa de corrosão como é possível observar na Figura 46 onde a maior probabilidade da taxa de corrosão está em valores muito baixos com utilização de inibidores.

4.1.1 - Tipos de inibidores

Os inibidores são divididos em 2 categorias:

4.1.1.1 - Inibidores por imersão

Sistemas aquosos são os mais comuns onde a aplicação de inibidores é utilizada pois a água é um solvente eficaz capaz de conter diversos íões ao mesmo tempo. Os inibidores são tipicamente usados em soluções para atingir inibição à corrosão por uma ou mais das formas.

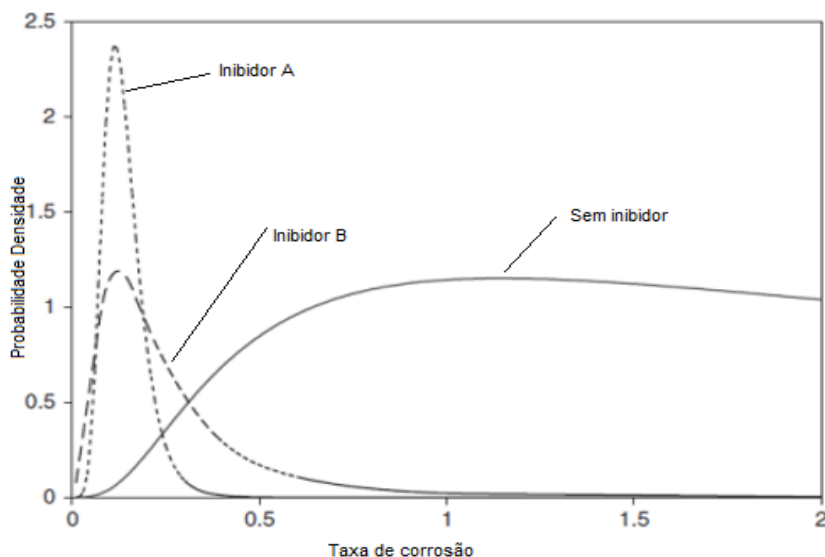


Figura 46 - Distribuição Lognormal da taxa de corrosão com e sem inibidores [14]

Inibidores de passivação anódica

Inibidores anódicos provocam o aumento na polarização onde a mudança de um grande potencial resulta em pouca corrente elétrica. A polarização do ânodo leva o potencial de corrosão a valores mais positivos que com pH elevado leva a passividade (Ver diagrama de Pourbaix Figura 16).

Inibidores catódicos

Estes tendem a reduzir a reação catódica ou provocar precipitação nas áreas catódicas aumentando a resistência no circuito e restringindo a difusão das espécies reduzidas nos cátodos. Alguns inibidores catódicos utilizam a alcalinidade para precipitar produtos insolúveis que protegem o metal.

Inibidores ôhmicos

Estes inibidores aumentam a resistência do eletrólito com a formação de uma fina película na superfície do metal.

Inibidores orgânicos

Constituem uma extensa classe de inibidores de corrosão que não podem ser classificados como anódicos, catódicos ou ôhmicos pois estes afetam toda a superfície do metal corroído quando em concentração suficiente. As áreas anódicas e catódicas são inibidas dependendo do potencial do metal, da estrutura química e tamanho da molécula do inibidor.

Os aniões costumam ser adsorvidos em casos de potencial mais positivo e catiões em situação de potencial mais negativo. Aniões de cloro (Cl^-), enxofre (S^{2-}) e outros tendem a ser prejudiciais, enquanto os catiões como do cálcio (Ca^{2+}), potássio (K^+), podem ser mais protetores.

Inibidores de precipitação

Os inibidores formam uma película de precipitados que interferem nas áreas anódicas e catódicas indiretamente. Os mais comuns são os silicatos e fosfatos que com pH de 7.0 aproximadamente causam passivação do aço na presença do oxigênio. Estes comportam-se como inibidores anódicos. Com quantidades insuficientes destes inibidores, a corrosão por *pitting* é comum em água do mar.

4.1.1.2 - Inibidores atmosféricos

São aplicados em forma de vapor de forma a atingir os elementos metálicos expostos à corrosão atmosférica.

Inibidores em fase de vapor

Também chamados de inibidores voláteis de corrosão, são compostos transportados por vapor pela volatilização da fonte. Quando em contato com a superfície metálica, condensa e tende a passivar a superfície.

4.2 - Proteções catódicas

A primeira aplicação de proteção catódica foi realizada por Sir Humphrey Davy, o homem que deu a oportunidade a Michael Faraday de entrar no mundo da ciência. Este começou com ânodos de sacrifício em barcos da marinha inglesa em 1824.

As proteções catódicas são muito usadas em estruturas marítimas, subterrâneas, tanques de água, tubagens de fluidos, e outras estruturas sujeitas a ambientes corrosivos.

4.2.1 - Proteções catódicas em ambientes aquosos

O princípio básico das proteções catódicas é reduzir ao máximo as reações anódicas na estrutura que força os ânodos locais a serem polarizados ao potencial dos cátodos locais limitando as células de corrosão.

4.2.1.1 - Ânodos de sacrifício

São relativamente baratos e de fácil instalação. Não torna possível a aplicação de corrente na direção contrária. A sua utilização é frequente em barcos que navegam no mar onde o zinco é um ânodo muito utilizado. A diferença galvânica entre metais é o que impede a corrente elétrica. Quanto maior for a diferença entre os metais, maior será a diferença de potencial e melhor o sistema de proteção. A série galvânica pode ser vista na Tabela 4.

De grosso modo, todo o metal que está em contato com o ânodo de sacrifício (Figura 47) passa a ser área catódica o que não tende a fenômenos de corrosão.



Figura 47 - Embarcação (esquerda) Ânodo sacrifício corroído vs novo (direita)

4.2.1.2 - Corrente impressa

Em ambientes aquosos, a corrente impressa é também muito utilizada em embarcações e de forma complementar com outras camadas protetoras já aplicadas. Estas camadas são usualmente sistemas de pinturas que dão uma proteção primária e a corrente impressa funciona como uma proteção de reserva quando esta se degrada ou apresenta defeitos ao longo do tempo. A necessidade de corrente impressa tende a aumentar com a deterioração das camadas de proteção, e, com o aumento da corrente as camadas de proteção mais rapidamente se deterioram.

A proteção catódica é atingida com o fornecimento de elétrons à estrutura metálica que suprime a dissolução do metal. No entanto, o efeito contrário leva a uma maior taxa de corrosão (Figura 48).

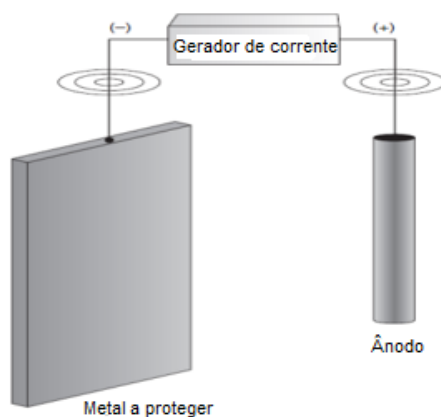


Figura 48 - Esquema de corrente impressa [14]

Nas embarcações de grande porte é utilizado este método onde ânodos de sacrifício são colocados em zonas estratégicas, ligados a um retificador de corrente que aplica-a no sentido do metal a proteger (polarização), atingindo a proteção do casco. Os eletrodos de referência servem de meio de comparação com a corrente em circulação nas imediações (Figura 49).

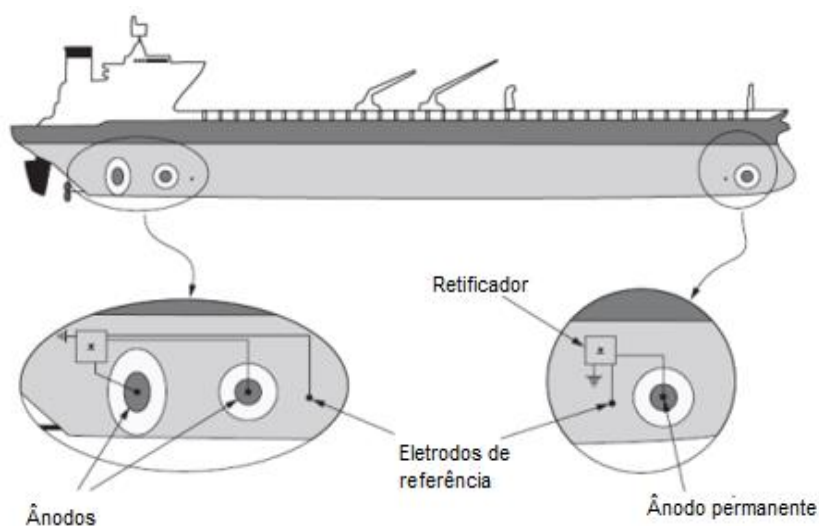


Figura 49 - Sistema corrente impressa em superpetroleiro [14]

A área catódica é muito maior que a anódica e existem diferentes níveis de densidade de corrente pelo fato de haverem diferentes áreas catódicas como zonas pintadas, zonas expostas e o bronze das hélices requererem diferentes polarizações para atingirem o efeito pretendido, o que demonstra a dificuldade de preparação deste tipo de sistema.

4.2.2 - Proteções catódicas em solos

As células de concentração de corrosão são os principais fomentadores de destruição na relação solo/metal. Elementos que atravessam diferentes camadas de solos com diferentes características e composições são particularmente suscetíveis à formação de células de concentração.

Em condições normais, a parte metálica em contato com o solo com melhor condutividade tende a ser o ânodo e a parte menos condutora o cátodo (Figura 50). A umidade funciona como o eletrólito e o próprio metal pode funcionar como o condutor, completando o circuito. A corrente flui da área anódica para o solo e depois para a área catódica.

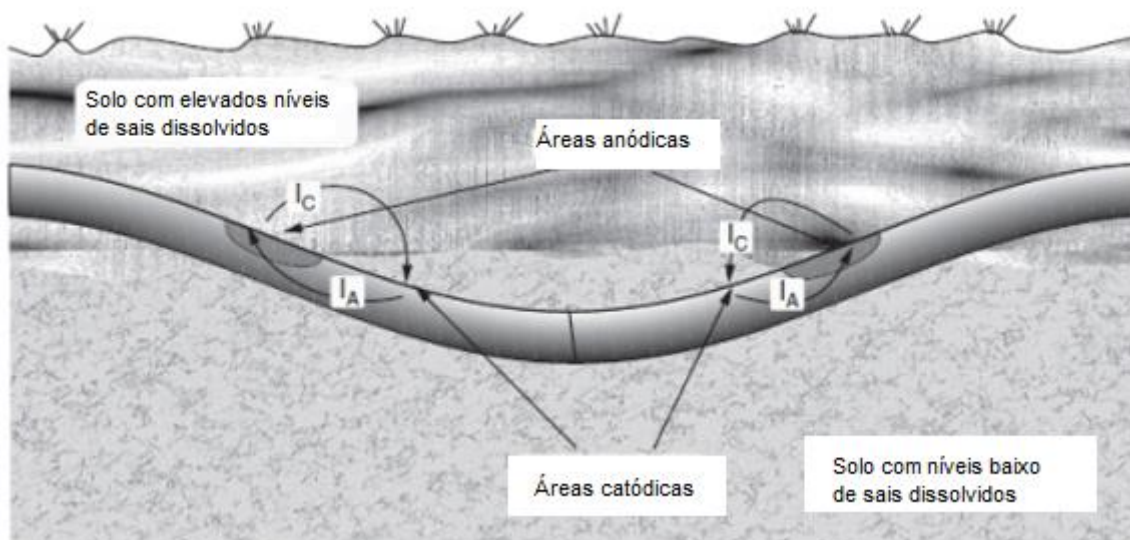


Figura 50 - Circuito em solo [14]

A corrente é limitada por fatores como a resistividade do solo e o seu grau de polarização nas áreas anódicas e catódicas. A corrosão surge nas áreas anódicas onde existem descargas de corrente para o solo.

4.2.2.1 - Ânodos de sacrifício

O objetivo das proteções catódicas têm por base a aplicação de um metal mais reativo que garanta o par galvânico com toda a área metálica exposta ao meio tornando-a mais catódica e mitigando a corrosão. Este tem uma base muito parecida com ambientes aquosos.

Convém salientar que o potencial entre o ânodo e a estrutura deve ser suficientemente grande para sobrepor-se as reações anódicas e catódicas locais. A constituição do ânodo deve manter a corrente suficiente no tempo de vida útil ou prazo de substituição.

4.2.2.2 - Corrente impressa

Em solos, a forma de funcionamento é muito similar aos ambientes aquosos (Figura 51). A corrente não provém do ânodo, mas de fonte externa de corrente impressa entre a estrutura e o ânodo com este ligado ao terminal positivo e a estrutura a proteger ao terminal negativo. Assim força a descarga de corrente no sentido da estrutura diminuindo a dissolução [11;14].

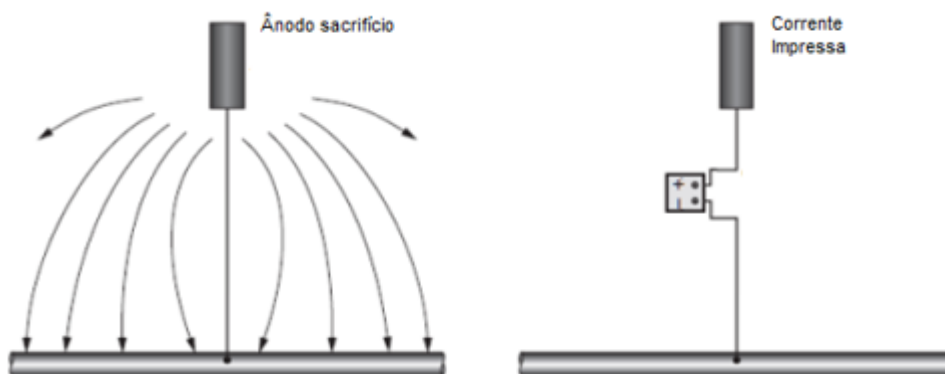


Figura 51 - Ânodo sacrifício (esquerda) vs corrente impressa (direita) [14]

4.2.3 - Proteções catódicas em betão armado

Os maiores causadores de corrosão em betão armado são os ataques por cloretos e a carbonatação. Estas formas de ataque não afetam diretamente o betão, mas os agentes agressivos que atacam o aço dependem de certa forma da porosidade deste para penetrarem até ao elemento metálico.

Os problemas associados com o betão armado podem surgir pela perda de aço levando a perda de resistência do elemento estrutural, mas também com o aumento do volume do próprio aço devido aos produtos de corrosão que levam a fendilhação e delaminação apresentados na Figura 52.

A fendilhação e delaminação são apenas alguns dos problemas que podem afetar o betão armado. Outros mais são portadores de problemas a este material, nomeadamente:

- Ataque químico - reações expansivas álcalis-agregados reativos e sulfatos, ação do mar;
- Desagregação do betão - desintegração sucessiva de camadas superficiais;
- Erosão - perda da pasta de cimento de ligação dos agregados;
- Infiltrações - deficientes drenagens ou impermeabilizações e superfícies porosas podem levar a vários problemas;
- Eflorescências - deposição de sais dissolvidos pela percolação de água no interior do betão.
- Ataque biológico - bactérias transformam compostos de enxofre em ácidos;
- Ação do fogo - temperaturas elevadas levam a desidratação dos componentes da pasta do ligante levando a perda de resistência;
- Ação gelo-degelo - provoca tensões de tração que provocam fendilhação.

Estes e mais alguns problemas inerentes ao próprio betão são ou podem ser um agravante aos mecanismos de corrosão que o aço é suscetível.

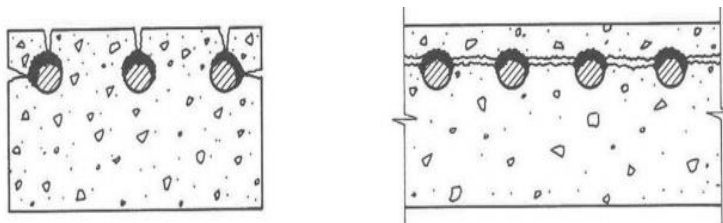


Figura 52 - Fendilhação (esquerda), delaminação (direita) [17]

4.2.3.1 - Ânodos de sacrifício

São tipicamente de zinco, podem ser aplicados de forma interna ou externa (Figura 53) e surgem de várias formas:

- Por aspersão térmica - aplicada diretamente na superfície do betão;
- Redes de zinco - aplicadas na superfície com ligação à armação de aço;
- Cilindros de zinco - envolvidos em revestimentos altamente alcalinos introduzidos no betão;
- Malhas de zinco - reforçadas com fibra de vidro e revestidas com argamassa cimentícia muito utilizada em ambientes marinhos de zonas de rebentação e salpicos.



Figura 53 - Aspersão térmica (esquerda), cilindros (direita) [17]

4.2.3.2 - Corrente impressa

Consiste na polarização da armadura de aço através de uma fonte de energia elétrica DC, levando a armadura a um potencial mais catódico. O processo é muito similar aos apontados anteriormente.

Em situações de pré-esforço de varões e cabos de aço, a quantidade de corrente aplicada pode ter algumas implicações. Corrente em excesso pode levar a fragilização por hidrogénio em sistemas de pré e pós tensão e também a degradação do betão através de reações expansivas álcalis-agregados. Pouca corrente pode não atingir o efeito pretendido. Existe a dificuldade de saber qual a corrente ideal para este tipo de situações pois a necessidade da corrente não pode ser medida diretamente e também pode mudar ao longo do tempo.

4.2.3.3 - Outros métodos de reparação/proteção eletroquímica do betão armado

A EN1504 define 11 princípios de reparação de estruturas de betão armado. Porém, alguns fogem do tema principal desta dissertação. Salienta-se os que mais se relacionam com a prevenção da corrosão apresentados na Tabela 7. Todos estes desde controlo de humidade (eletrólito) às proteções catódicas têm algum tipo de efeito de prevenção na corrosão. No entanto, é importante salientar os que estão diretamente ligados com a corrosão.

Tabela 7 - Princípios de proteção/reparação (Adaptado de [18])

PRINCÍPIO	DEFINIÇÃO	MÉTODO	BREVE DESCRIÇÃO
P1	Proteção contra substâncias agressivas	M1.1	Impregnação hidrófoba
		M1.2	Selagem dos poros do betão
		M1.3	Revestimento de fendas com membrana
		M1.4	Preenchimento de fendas
		M1.5	Alterar a fenda para uma junta
		M1.6	Proteção da estrutura com barreira exterior
		M1.7	Proteção superficial com pintura
P2	Controlo de humidade no betão	M2.1	Proteção com impregnação hidrófoba
		M2.2a	Proteção superficial por selagem dos poros
		M2.2b	Proteção superficial com pintura
		M2.3	Proteção da estrutura com barreira exterior
		M2.4	Desumificação eletroquímica
P6	Aumento da resistência química	M6.1a	Aplicação de uma superfície de desgaste
		M6.1b	Aplicação de membranas
		M6.2	Aplicação de selante
P7	Repassivação de armaduras	M7.1	Aumento do recobrimento com betão ou argamassa
		M7.2	Substituição do betão contaminado
		M7.3	Realcalinização eletroquímica
		M7.4	Realcalinização passiva
		M7.5	Dessalinização eletroquímica
P8	Aumento da resistividade elétrica do betão	M8.1	Controlo da humidade do betão com revestimentos superficiais
P9	Controlo das zonas catódicas das armaduras	M9.1a	Controlo da penetração de oxigénio por membranas
		M9.1b	Controlo da penetração de oxigénio por saturação do betão
P10	Proteção catódica das armaduras	M10.1a	Proteção catódica passiva
		M10.1b	Proteção catódica ativa
P11	Controlo das zonas anódicas das armaduras	M11.1	Proteção das armaduras com pinturas de barreira
		M11.2	Proteção das armaduras com pinturas de sacrifício
		M11.3	Inibidores de corrosão para reparação

Realcalinização

O método tem por objetivo fornecer ao betão carbonatado alcalinidade para restabelecer capacidade passivadora ao aço. A aplicação de um campo elétrico entre a armadura e uma malha de aço envolvida em uma solução alcalina leva a produção de hidróxidos que reagem com o sódio e outros elementos aumentando o pH para valores superiores a 10.5 (Figura 54).

Após a realcalinização deverá ser introduzida a uma proteção superficial no betão.

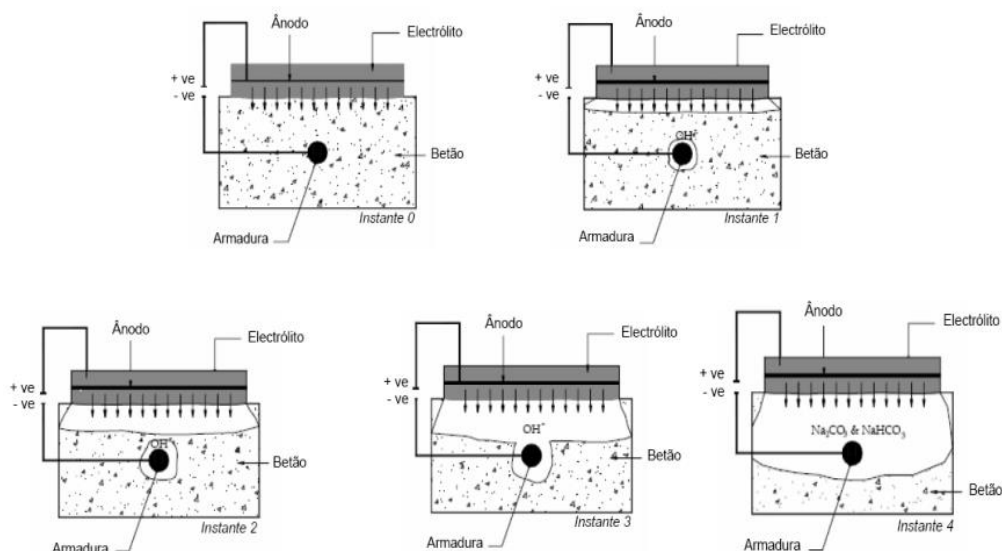


Figura 54 - Processo de realcalinização [17]

Recalinição vs proteção catódica

A Figura 55 mostra o trajeto dos métodos de proteção das armaduras no diagrama de Pourbaix:

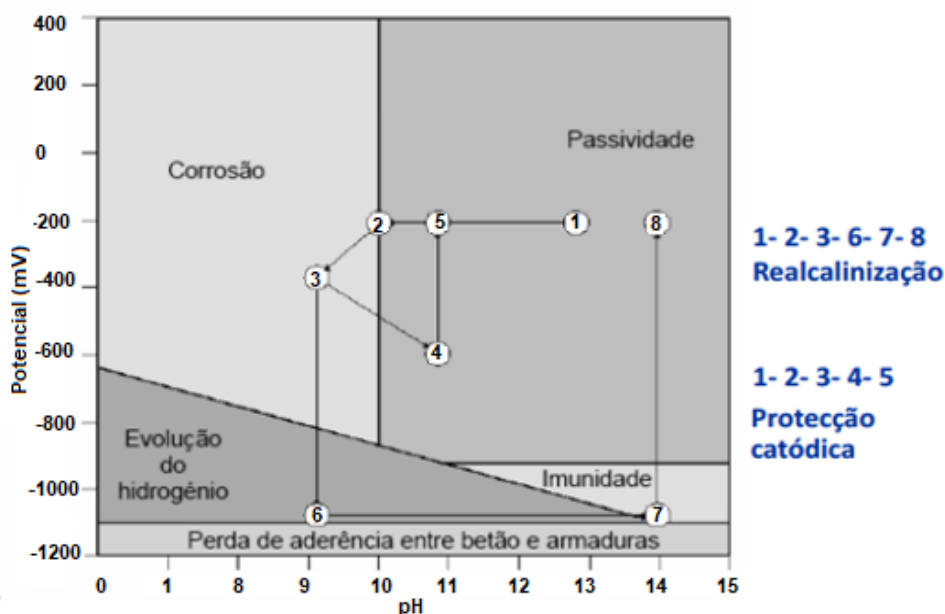


Figura 55 - Recalinição vs proteção catódica [17]

Dessalinização

Este método baseia-se na remoção de aniões de cloro do betão por indução elétrica (Figura 56). É atingido com a migração destes para uma elétrodo externo (malha metálica produzida para o efeito envolvida num eletrólito), e a migração de catiões para as armaduras produzindo hidróxidos pela reação catódica.

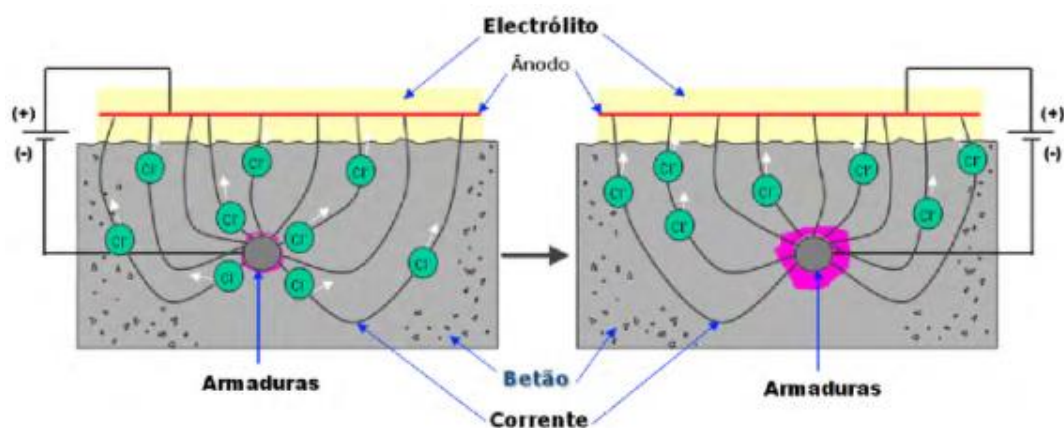


Figura 56 - Esquema de dessalinização [19]

Dessalinização vs proteção catódica

Da Figura 57 podemos verificar que com o aumento da percentagem de cloretos, há uma tendência para corrosão por *pitting* até a dessalinização, enquanto a proteção catódica consegue atenuar mesmo com o aumento dos cloretos [11;17;18;19;20].

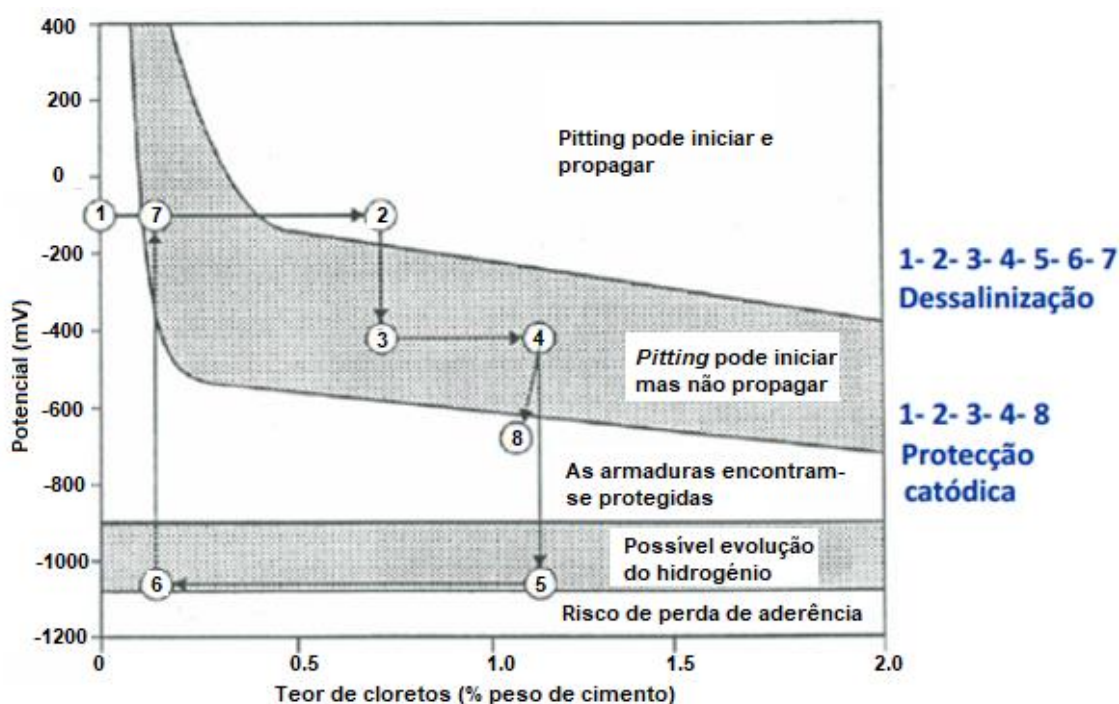


Figura 57 - Dessalinização vs proteção catódica [17]

4.3 - Proteções anódicas

Esta é relativamente recente comparando com as proteções catódicas. É baseada na formação de uma película protetora em metais pela aplicação externa de correntes anódicas. Quando o potencial de um metal é alterado para valores mais positivos por polarização, a corrente necessária para causar essa alteração vai diminuindo. Essa é uma característica dos metais com transição ativo-passiva apresentada na Figura 58 que são ideais para proteções anódicas. Metais como níquel, ferro, cromo, titânio e suas ligas são candidatos perfeitos.

Para atingir a passivação, a densidade de corrente crítica (i_{cc}) deve ser excedida e o potencial anódico deve ser mantido na região passiva. Apesar da densidade de corrente ser elevada para atingir a passivação, apenas uma pequena parcela é necessária para mantê-la desde que ultrapasse o valor de i_{cc} .

Algumas das vantagens que surgem com a utilização deste tipo de proteção destacando-se a aplicabilidade em ambientes muito corrosivos, e a taxa de corrosão é equivalente à corrente aplicada o que oferece um meio direto de monitorização da corrosão no sistema. Todavia, as proteções anódicas são menos utilizadas comparativamente às catódicas pela simples razão de as anódicas serem mais apropriadas para ambientes muito corrosivos nomeadamente em proteções contra ácidos.

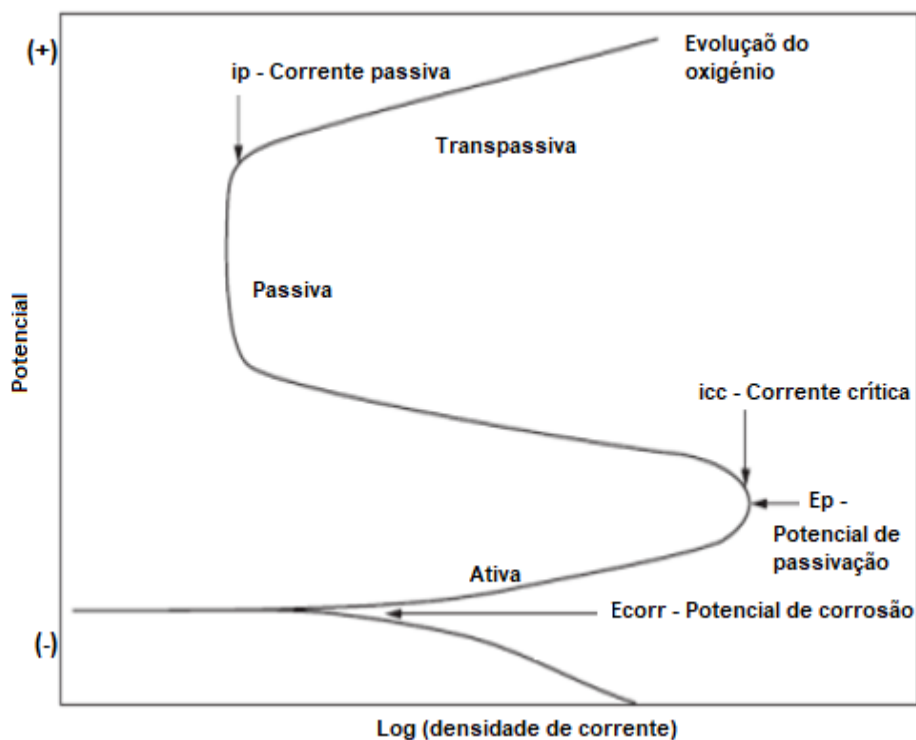


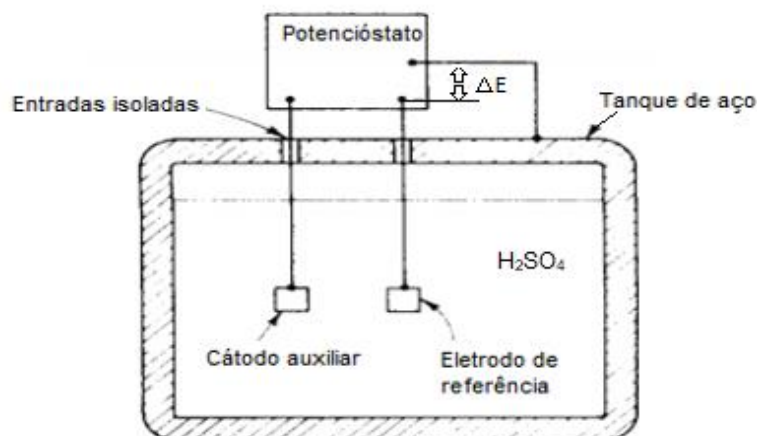
Figura 58 - Diagrama de polarização em regiões ativas, passivas e transpassivas [14]

Para obter-se uma proteção anódica apresentada na Figura 59, é necessário:

- Um potencióstato - de modo a manter um potencial constante perante o eléctrodo de referência;
- Eléctrodo de referência - existe a necessidade de controlar firmemente o potencial do elemento metálico;
- Cátodo - de preferência elementos resistentes à dissolução seja pela solução ou pela corrente impressa como latão platinado, cobre, aço niquelado;
- Ânodo - elemento metálico neste caso, a proteger.

O potencióstato garante a medição e comparação do potencial para valores pré-definidos e controla a corrente DC entre o cátodo e o elemento metálico.

Em termos de concepção do elemento metálico, algumas considerações podem ser tomadas de modo a otimizar o desempenho da proteção. Elementos com arestas, reentrâncias e superfícies irregulares dificultam a estabilização da densidade de corrente pré-definida em toda a estrutura.

Figura 59 - Proteção anódica em tanque de ácido sulfúrico (H_2SO_4) [11]

4.3.1 - Proteções catódicas vs anódicas

Estes tipos de proteções metálicas tendem a complementarem-se uma à outra. As proteções anódicas podem ser utilizadas num variado leque de ambientes desde fraca a elevada corrosividade onde os metais de transição ativo-passiva necessitam de elevada corrente impressa até atingirem determinado patamar depois esse valor cai para valores fáceis de manter, enquanto as catódicas tendem a ambientes de moderada corrosividade e pela constante necessidade de corrente que aumenta com a gravidade do ambiente corrosivo deixam de ser aplicáveis.

A instalação de proteções catódicas é relativamente mais económica pois os componentes são simples e de fácil instalação. As proteções anódicas são mais complexas que requerem componentes de custo mais elevado como o potenciômetro e o eletrodo de referência. Para manter uma densidade de corrente uniforme necessária nas proteções catódicas em toda a estrutura pode ser necessário a utilização de vários ânodos de sacrifício, contrariamente as anódicas que atingem os valores necessários em condições ideais apenas com um cátodo [11].

Outras diferenças notórias são apresentadas no quadro de comparação entre as proteções apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação anódicas/catódicas [11]

	PROTEÇÃO ANÓDICA	PROTEÇÃO CATÓDICA
Metais aplicáveis	Apenas metais ativos-passivos	Todos os metais
Tipo de corrosividade	Fraco a agressivo	Fraco a moderado
CUSTOS RELATIVOS		
Instalação	Alto	Baixo
Operação	Muito baixo	Médio a alto
Corrente requerida	Muito alto	Baixo
Significância da corrente aplicada	Oferece uma medição direta para a taxa de corrosão	Complexo, difícil análise da taxa de corrosão
Condições de operacionais	Pode ser determinada por medições eletroquímicas	É determinada através de dados empíricos

4.4 - Revestimentos

Dentro dos revestimentos podemos encontrar 3 classes:

1. Orgânico;
2. Inorgânico;
3. Metálico.

4.4.1 - Revestimentos orgânicos

Baseia-se na criação de uma barreira física entre o metal e o ambiente corrosivo. Este tipo de revestimento também contém diversos tipos de inibidores e aditivos de modo a mitigar os processos de corrosão. Incluem pinturas, resinas e vernizes de aplicação na superfície metálica.

Este tipo de revestimento foi muito desenvolvido na indústria petrolífera de forma a proteger estruturas de ambientes industriais e marinhos. A utilização de mais de um tipo de revestimento ou a aplicação deste tipo sobre outros é uma prática comum para efeitos de acabamento, proteção extra e estética.

As pinturas (Figura 60) tendem a ser as mais utilizadas deste tipo, no entanto, as resinas e vernizes podem ter as mesmas bases. Os sistemas de pintura são muito variados dependendo do ambiente de exposição, do tempo de vida pretendido para a estrutura, do tipo de estrutura, de intervenções planeadas a curto, médio e longo prazo e até por fatores económicos.

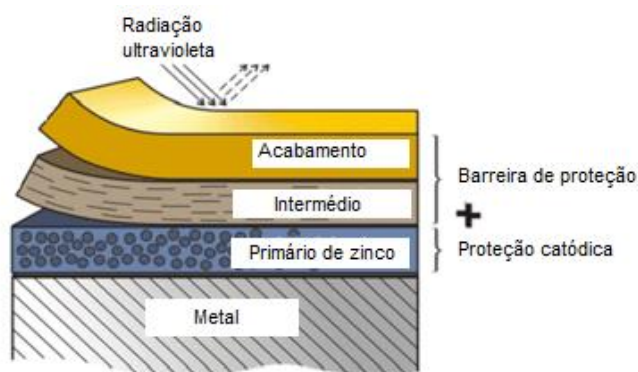


Figura 60 - Exemplo de esquema de pintura [22]

4.4.1.1 - Constituintes de esquemas de pintura

As camadas presentes num esquema de pintura podem ser aplicadas de várias formas, tais como:

- Rolo e trincha;
- Instrumentos de pulverização (pistola ar/airless).

Importa salientar que cada camada pode ser constituída por uma ou mais demãos de aplicação em regime de retoque ou aplicação geral.

Primários

São aplicados diretamente sobre o substrato metálico com a finalidade de garantir uma boa aderência para as camadas seguintes. Também tem a função de inibidor e tendem a serem ricos em metais anódicos como o zinco. Estas camadas são de pequena espessura (<75µm).

Intermédios ou camadas secundárias

Estas podem ser a camada final ou apenas mais uma camada com o objetivo de “dar corpo” ou garantir maior espessura. Os intermédios podem servir de camada de ligação entre o primário e camadas subsequentes.

Acabamento ou camada final

Tem a função de garantir esteticamente um bom acabamento. Garante uma maior durabilidade às camadas inferiores devido à sua densidade e características hidrófobas que reduzem a permeabilidade e difusão da humidade. Também têm a função de garantir uma resistência superficial à abrasão, impacto, ação química e à radiação reduzindo a fotodegradação¹¹ entre outras.

A gama de durabilidade das proteções por pinturas varia em três categorias (Tabela 9). Considera-se tempo de vida útil de um sistema de pintura o período que medeia entre a aplicação do sistema e a necessidade de uma grande manutenção por repintura. Todavia, as durabilidades apontadas não são equivalentes ao “tempo de garantia” e a todos os esquemas de pintura. O grau de deterioração antes da 1ª grande manutenção deve ser acordado pelas partes interessadas ou pelos valores recomendados na norma ISO 4628. Logo, o tempo de garantia depende de muitas situações que por vezes é decidido através da experiência de pessoal especializado e costuma ser inferior à gama de durabilidade.

Tabela 9 - Gama de durabilidade [16]

Baixa (B)	2 A 5 anos
Média (M)	5 a 15 anos
Elevada (E)	>15 anos

4.4.1.2 - Componentes base das camadas

Resinas ligantes

Para ter uma boa performance, o ligante deve garantir que a camada aplicada, após a cura, seja densa, sólida e aderente. A capacidade de manter uma elevada densidade deve-se ao tamanho das suas moléculas. Ligantes com maior peso molecular formam camadas pela evaporação do veículo (solventes), enquanto de menor peso molecular geralmente reagem “in situ”.

Pigmentos

Essencialmente são pós secos adicionados para garantir algumas características desejadas, tais como cor, resistência à corrosão, propriedades não derrapantes, aderência, controlo de brilho, proteção à resina ligante. Vários tipos de pigmentos podem estar presentes na mesma camada. Os fosfatos de zinco são provavelmente os pigmentos mais importantes em tintas anticorrosivas pelas características de resistência e inibição à corrosão.

Solventes

Vários solventes podem ser encontrados na mesma camada. Estes influenciam a viscosidade, velocidade de secagem, características de dispersão, brilho, entre outras. Cada camada, dependendo da sua especificidade pode conter um solvente (ou o de maior quantidade presente), diferente das outras camadas.

¹¹ Decomposição ou dissociação de compostos químicos causados pela luz ou pela radiação ultravioleta

Existem vários tipos de solventes desde:

- Líquidos orgânicos – Diluentes, naftas de petróleo, xilenos, MEK, acetato de butilo, etilbenzeno, etc.;
- Água.

A água tem sido uma aposta quase forçada pelas recentes regulações de redução de emissões de compostos orgânicos voláteis (COV) em aplicações de tintas e vernizes [11;22;23].

4.4.2 - Revestimentos inorgânicos

São produzidos por ação química, com ou sem assistência elétrica e incluem diversas classes de materiais. Alguns tratamentos podem alterar a superfície do metal para uma película protetora óxida que tem melhor resistência que as películas naturais e até garantem uma base para aplicação de outros revestimentos suplementares como pinturas.

4.4.2.1 - Argamassa hidráulica

Estas podem endurecer mesmo quando submersas em água. São muito utilizados na proteção de tubagens enterradas ou submersas. Este revestimento protege o elemento metálico do contacto com a água e outros líquidos e também é eficaz em ambientes corrosivos gasosos.

A argamassa hidráulica garante um pH elevado na superfície metálica através da sua reação alcalina que previne eficazmente a corrosão. Em situações de fissuração ou fragmentação do material como mostrado na Figura 60 resulta na exposição do metal e conseqüente possibilidade de corrosão.



Figura 61 - Fragmentação de Argamassa hidráulica [14]

4.4.2.2 - Cerâmicos

Podem ser usados quase da mesma forma que a argamassa hidráulica mas têm a particularidade de darem resistência em situações de alta temperatura (corrosão seca). São eficientes desde que resguardados de desgaste mecânico, pois são um material frágil e de difícil reparação.

4.4.2.3 - Anodização

É uma técnica muito utilizada em metais como alumínio, magnésio, titânio, entre outros, como revestimento inorgânico. Funciona com a aplicação de um potencial anódico por corrente impressa através de imersão do metal num eletrólito que converte a superfície metálica em um óxido de alumínio. A superfície oxidada fica provida de resistência à abrasão e corrosão e de elevada dureza.

O alumínio e as suas ligas são propícios a este tipo de tratamento e é utilizado em diversas aplicações. O tratamento garante:

- Boa aparência - Bom acabamento, de fácil limpeza e duradouro;
- Resistência à corrosão - A superfície muito lisa dificulta a incrustação de impurezas;
- Resistência à abrasão - A dureza conferida ao metal é normalmente superior aos abrasivos.

O processo de anodização (Figura 62) consiste numa sequência de fases de imersão no eletrólito que garantem a limpeza, preparação, anodização e selagem.

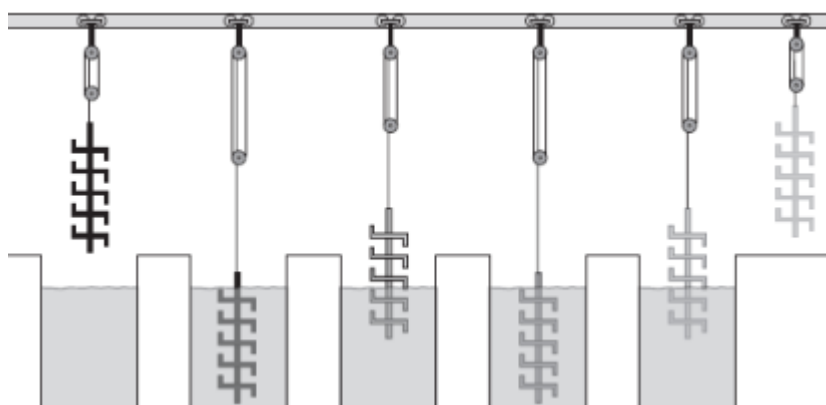


Figura 62 - Fases para anodização de peça alumínio [14]

Para atingir as qualidades protetoras, os óxidos anódicos devem ser selados com a produção de uma outra camada óxida hidratada não condutora que garante uma superfície muito lisa. A selagem (Figura 63) é uma fase fundamental e é atingida pela imersão em soluções de acetato de níquel. Colorações também podem ser inseridas nesta fase dando capacidade de diferenciação de outros produtos.

A diferença entre este tipo de proteção e outros passa pelo fato de este ser integrado na superfície metálica e não por deposição.

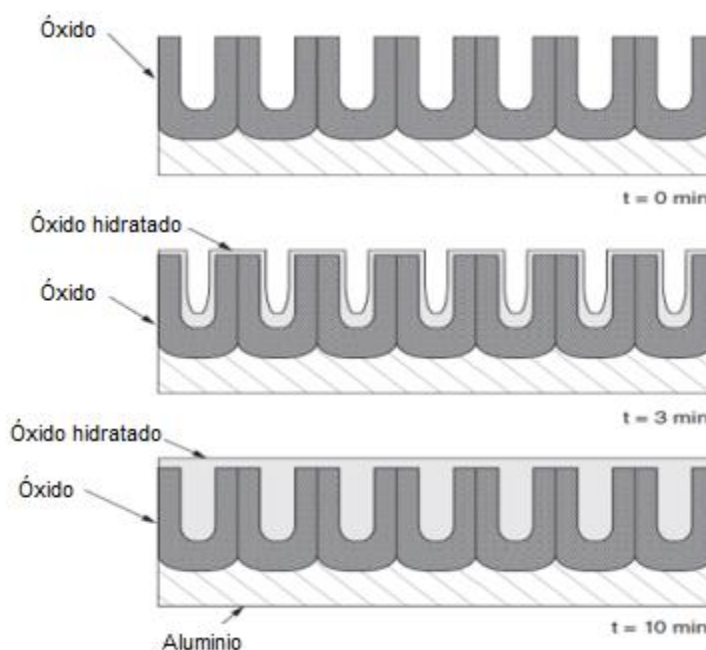


Figura 63 - Evolução da película óxida hidratada em função do tempo a 85°C [14]

4.4.2.4 - Fosfatização

Consiste numa camada porosa de pequenos cristais de fosfato, firmemente ligada ao aço atingida pela imersão do metal em solução fosfatizante de zinco ou manganês, onde surgem reações químicas que levam à formação de uma película de fosfato insolúvel. Esta não garante resistência à corrosão quando aplicado só, depende de outro tipo de tratamento complementar para colmatar a incapacidade perante elementos corrosivos, mas garante uma excelente base para óleos protetores, tintas e previne o alastramento da corrosão por debaixo das camadas de pintura.

4.4.2.5 - Cromatização

Alumínio, zinco e cádmio são frequentemente revestidos por uma película de cromato atingida por reações químicas após a imersão em soluções de ácido crômico (Figura 64). A película pode ter diferentes colorações dependendo da base da liga. Esta é formada por cromatos solúveis que funcionam como inibidores à corrosão. O revestimento pode servir como camada base para outros tratamentos ou como acabamento decorativo em diversas peças.



Figura 64 - Fosfatização (esquerda), cromatização (direita) de peças [24]

4.4.3 - Revestimentos metálicos

Em utilizações mais exigentes onde o metal pode ser sujeito a impacto, abrasão e altas temperaturas, os revestimentos metálicos tendem a ter um melhor comportamento relativamente aos outros tipos. No entanto, a possibilidade da existência de um par galvânico incompatível entre o substrato e o revestimento deve ser cuidadosamente verificado, pois na presença de um eletrólito, a diferença no par galvânico pode levar a um acentuado caso de corrosão por *pitting* em casos de danos ou falhas no revestimento (Figura 65).

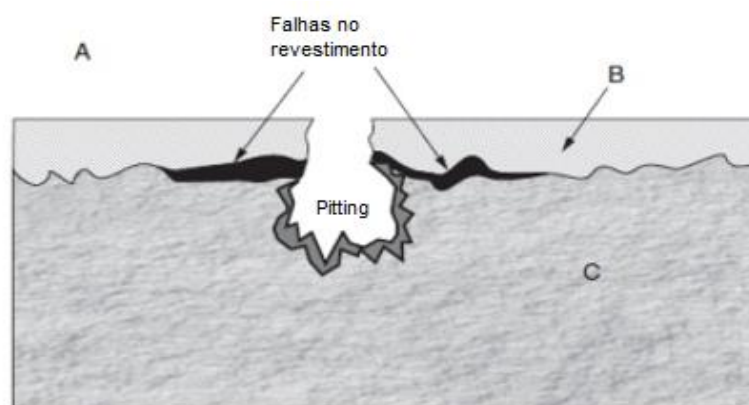


Figura 65 - Consequência do par galvânico, eletrólito (A), camada catódica (B), metal (C) [14]

De uma maneira geral a proteção conferida pelos revestimentos metálicos depende mais do material metálico selecionado para o revestimento e da sua espessura do que do método de aplicação do revestimento. A escolha do revestimento metálico a utilizar deve depender do ambiente e da agressividade ao qual o metal está exposto, da atividade mecânica a que está sujeito e do tempo de vida útil a que deve garantir um bom funcionamento.

4.4.3.1 - Eletrodeposição

É atingida a eletrodeposição com a imersão e passagem de corrente elétrica numa solução contendo íons metálicos onde o metal a tratar serve de cátodo numa célula eletroquímica, atraindo os íons da solução. Isto leva a formação de uma fina e coerente película protetora.

O processo é regulado pelo controlo da corrente, pela temperatura e tempo de imersão. Logo, apenas os metais que podem ser reduzidos em soluções aquosas podem ser efetivamente eletrodepositados. A única exceção é o alumínio que pode ser eletrodepositado apenas em eletrólitos orgânicos não aquosos.

Os chamados cromados muito utilizados na indústria automóvel provêm deste processo onde é eletrodepositado o cromo seguido de níquel que garante um excelente acabamento semelhante ao aço inoxidável. Este tipo de revestimento é muito comum em peças de tamanho reduzido (Figura 66).

Também é possível a eletrodeposição sem corrente elétrica, principalmente do níquel onde a deposição é fornecida por um agente redutor na solução. Este tipo de revestimento tem o problema de fissurar em ciclos de expansão e contração ou impacto. Outro problema surge na grande quantidade de hidrogénio na superfície que pode levar à fragilização por hidrogénio em aços de elevada resistência.



Figura 66 - Peças cromadas [24]

4.4.3.2 - Galvanização/Sherardização

Este processo é muito utilizado em muitas aplicações industriais onde o ferro e aço macio é usado. O seu processo simples de proteção é uma vantagem notória relativamente a outros tipos de proteção. Este processo é obtido pela imersão a quente do metal em zinco derretido.

A proteção eletroquímica provida pelo zinco é o elemento vital para a proteção à corrosão. Como o zinco funciona como ânodo de sacrifício, e a espessura de zinco no revestimento determina o desempenho da proteção ao longo do tempo.

No revestimento, formam-se camadas com diferentes durezas e diferentes percentagens de zinco. A espessura do zinco também depende:

- Da dimensão e espessura da peça;
- Preparação da superfície do aço;
- Composição do aço.

Também são recomendadas espessuras mínimas para este tipo de revestimento segundo a norma NP EN ISO 1461 apresentada na Tabela 10:

Tabela 10 - Espessura média de revestimento em função da espessura da peça metálica [25]

Espessura da peça de aço/mm	Espessura média (mínima) do revestimento de zinco		Espessura local (mínima) do revestimento de zinco	
	g/m ²	µm	g/m ²	µm
Aço <1,5mm	325	45	250	35
Aço >1,5mm e <3mm	395	55	325	45
Aço >3mm e <6mm	505	70	395	55
Aço >6mm	610	85	505	70
Peças vazadas <6mm	505	70	430	60
Peças vazadas >6mm	575	80	505	70

Podem ser obtidos espessuras superiores com o aumento da rugosidade da superfície através da preparação e limpeza da mesma por projeção de abrasivos. A utilização de aços reativos cujo teor em sílica e fósforo fazem que no banho a espessura do revestimento cresça sempre em função do tempo de imersão com a desvantagem de ficarem mais frágeis.

O facto da taxa de corrosão na atmosfera ser aproximadamente linear com o tempo oferecem valores credíveis à durabilidade (Figura 67).

Espessura mínima (µm)	Categoria de corrosividade							
	Tempo mínimo/máximo até à primeira manutenção (anos)							
	Classe de durabilidade							
	C3		C4		C5		>C5	
85	40/>100	VH	20/40	VH	10/20	H	3/10	M
140	67/>100	VH	33/67	VH	17/33	VH	6/17	H
200	95/>100	VH	48/95	VH	24/48	VH	8/24	H

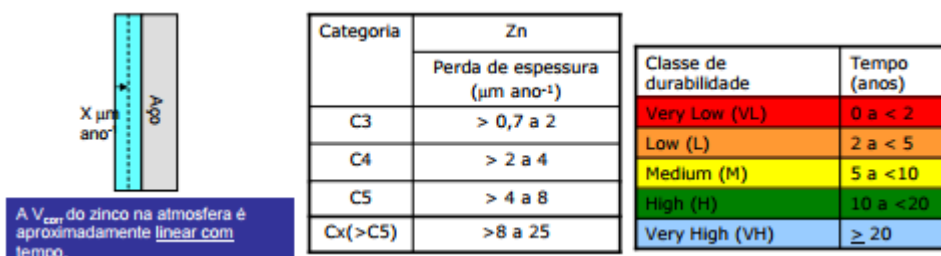


Figura 67 - Durabilidade de elementos galvanizados [26]

Outras vantagens e desvantagens da galvanização:

Vantagens:

- Boa aderência (ligas intermetálicas);
- Espessura uniforme;
- Resistente à abrasão;
- Permite obter espessuras variadas;
- Versatilidade de revestir peças complexas.

Desvantagens:

- Necessidade de furação das peças de seção fechada para exaustão dos gases para imersão;
- Devido à imersão a elevadas temperaturas, pode provocar distorção.

Um outro processo surgiu através da galvanização por imersão e muito similar chamado galvanização a seco ou sherardização (Figura 68), segundo o nome do inventor Sherard Osborn Cowper-Coles. O processo tem muitas das vantagens do anterior mas, pelo facto de as peças a tratar terem de ficar dentro de um tambor rotativo condiciona e muito o tamanho das peças. O tambor é aquecido aos 450°C onde o zinco é introduzido em pó, onde evapora e por difusão fixa-se na superfície metálica [14;15;22;25].



Figura 68 - Galvanização (esquerda) Sherardização (direita) [22]

4.4.3.3 - Metalização

Esta técnica consiste na projeção térmica de um tipo de metal para revestimento sobre o substrato a proteger. A aderência ao substrato é essencialmente mecânica e o revestimento é normalmente rugoso. Os revestimentos podem ser aplicados em obra ou em fábrica e o tamanho da peça não é limitação. A superfície do aço permanece fria logo, não provoca distorção, O método de projeção pode variar consoante o tamanho das peças, a natureza do material de projeção, o custo, a finalidade, entre outros.

Dos metais mais utilizados para projeção, destacam-se:

- Zinco - Resistência à corrosão e aderência elevada;
- Alumínio - Alta resistência ao calor e gases corrosivos, alta distribuição de calor e capacidade refletora;
- Cobre - Elevada condutividade elétrica e térmica;
- Níquel - Alta resistência à corrosão e acabamento de qualidade.

A maquinaria utilizada (Figura 69) para este tipo de revestimentos varia muito em tamanho podendo adaptar-se ao local de aplicação e o tipo de utilização (intensiva ou periódica).



Figura 69 - Maquinaria tocha de combustão (esquerda) e arco elétrico (direita) [27]

Existem vários processos de projeção térmica, dos mais utilizados apontam-se:

Tocha de combustão:

Através da tocha de combustão, surgem quatro formas de aplicação:

- **Projeção por chama** - O material é acelerado à velocidade de 30 a 90m/s. O material fundido instala-se na superfície e solidifica com aspeto rugoso. Esta técnica pode ser usada para depositar vários revestimentos ferrosos, níquel, ligas de cobalto e alguns cerâmicos.
Vantagens: Custo geral do equipamento baixo, facilidade de manuseamento e simplicidade, espessuras de 500 a 3500 μ m, eficiência de utilização do material e baixos custos de manutenção associados.
Desvantagens: Pouca resistência ao impacto e espessura limitada.
- **Oxi-combustão de alta velocidade (HVOF)** - O revestimento é aquecido ao ponto de fusão e acelerado num fluxo de combustão a gás ou líquido de alta velocidade entre 550 a 800m/s. É utilizado na aviação, indústria automóvel, petroquímica.
Vantagens: A alta velocidade faz com que as partículas fiquem achatadas ao impacto garantindo um revestimento muito denso e liso, garante aderência ao substrato e espessuras entre 0.013 a 3000 μ m.
Desvantagens: A redução de alguns óxidos que podem surgir alterando as propriedades do revestimento. O investimento em equipamento é mais elevado que o anterior.
- **Pistola de detonação** - Após provocada a detonação, a expansão do gás quente acelera os materiais fundindo-os.
Vantagens: Produz um dos revestimentos mais densos. Consegue-se espessuras de 50 a 500 μ m. Devido às altas velocidades, as propriedades do revestimento são menos sensíveis ao ângulo de deposição. Custo médio.
Desvantagens: Este método é muito restrito devido aos carbonetos.

Arco elétrico:

Através de arco elétrico surgem duas formas:

- **Arco elétrico** - Atinge velocidades de 30 a 150m/s. É muito utilizado em materiais sensíveis ao calor.
Vantagens: A espessura pode ir desde 100 μ m a quase ilimitada dependendo do objetivo. Tem aspeto rugoso e é usado em revestimentos mais correntes (zinco, cobre). Custo relativamente baixo.
Desvantagens: Baixa aderência e elevada porosidade.

- **Plasma** - Esta técnica deposita molibdênio, cromo e ligas de cobalto a alta velocidade (>550m/s). Utilizado em motores de combustão de aviões.

Vantagens: Pode atingir espessuras de 300 a 6000µm. Podem ser usados diversos revestimentos como zinco, alumínio e outros materiais cerâmicos. Com o devido controle podem ser atingidas diversas propriedades físicas como a porosidade que pode variar de quase zero a elevada.

Desvantagens: O processo pode ser de custo elevado devido aos revestimentos mais nobres.

Outros mais processos são possíveis, no entanto são virados para metais mais especializados como para o ramo da aeronáutica ou aeroespacial, componentes eletrônicos, implantes corporais, entre outros.



Figura 70 - Projeção por arco elétrico, maquinaria (esquerda e centro) rugosidade do revestimento (direita)

4.4.3.4 - Esquemas de revestimentos mistos

A aplicação de mais do que um tipo de revestimento tem vantagens não só pela estética. Camadas de pintura aplicadas em outros revestimentos podem ser usadas como proteção adicional sobretudo em ambientes mais corrosivos (orla costeira, zonas industriais muito poluídas). O esquema¹² misto beneficia de um efeito sinérgico entre revestimentos.

$$T_{\text{misto}} > (T_{\text{revestimento}} + T_{\text{Tinta}}) \quad \text{Com } T = \text{Tempo de vida} \quad \text{Equação (10)}$$

Porém, o período de manutenção de esquemas mistos é particularmente inferior ao do revestimento. No caso de revestimentos metálicos (exemplo do zinco), a durabilidade do revestimento é muito superior ao da pintura, o que leva a possíveis manutenções programadas em zonas danificadas a curto/médio prazo em regime de retoque ou pinturas gerais de modo a garantir o bom desempenho do esquema.

Nestes esquemas tal como em qualquer outro tipo de revestimento, há que ter em atenção a aderência entre materiais diferentes. Os fatores em ter em conta estão presentes na ISO 12944-4 [14;16;27;28].

¹² Define-se como os processos que o substrato é submetido desde a fase inicial (limpeza do substrato) à fase final (acabamento).

4.4.4 - Problemas que comprometem os revestimentos

Os revestimentos por vezes falham por um elevado número de condições adversas: mecânicas, atmosféricas, etc. Porventura porque a fase dos revestimentos não é propriamente projetada como outro qualquer projeto, partindo da conceção e dimensionamento de determinada estrutura. A fase do revestimento toda ela deve ser antecipadamente ponderada e preparada com monitorização faseada ao longo de todo o processo.

A EN NP ISO 12944-3 referida na Figura 71 aponta alguns dos critérios básicos sobre conceção para a proteção anticorrosiva:

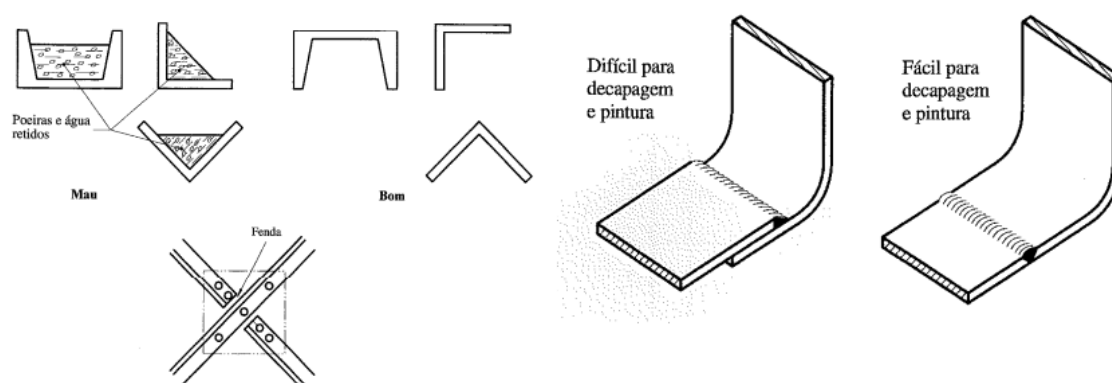


Figura 71 - Critérios de boa conceção [16]

Outros fatores não presentes nas normas também podem otimizar a proteção, nomeadamente:

- Decisões relativas aos revestimentos anticorrosivos devem ser tomadas por pessoal experiente e com formação para tal;
- Opção de utilização de sistemas de pintura apropriados e não dos chamados “mais económicos”;
- Seleção ponderada dos materiais utilizados;
- Outros fatores como condições do equipamento de aplicação, experiência e habilidade dos aplicadores.

Neste trabalho, já foi referido sobre os sais solúveis e cloretos. Mas, este é um problema recorrente para qualquer tipo de revestimento anticorrosivo. Por esta razão, é muito aconselhável o controlo do nível de cloretos por medição frequente e se necessário, o procedimento de lavagem do substrato. O método de medição é falado na subseção seguinte.

Muitos revestimentos não garantem as propriedades físicas desejáveis quando aplicados acima de 80% de humidade relativa e temperatura próxima do ponto de orvalho ($(T_{\text{ambiente}} + 2^{\circ}\text{C}) > T_{\text{orvalho}}$). Logo, o controlo destes fatores podem ser uma mais valia.

A taxa de contaminantes e difusão da água pelo revestimento é fundamentalmente controlada pela espessura aplicada. Baseada em considerações teóricas e dados empíricos, a espessura mínima para resistir estes elementos é de 125µm. Uma camada homogénea em espessura pode também facilitar o controlo. As espessuras recomendadas também podem depender do substrato. A norma EN NP ISO 1460 recomenda as espessuras para galvanizado, a EN NP ISO 14616 para aspersão térmica e EN NP ISO 12944-5 para pinturas. Estas recomendações encontram-se em Anexo 1 [14;16;28].

4.4.5 - Controlo e inspeção dos revestimentos

O perfil do substrato (Figura 72) tem um papel relevante nos revestimentos principalmente na aplicação de finas camadas. Superfícies muito irregulares levam a diferentes espessuras, logo a possíveis diferentes graus de proteção.

Na Figura 72 denota-se zonas suscetíveis ao ataque (A), zonas com maior espessura (B), diferentes graus de cobertura do revestimento (C).

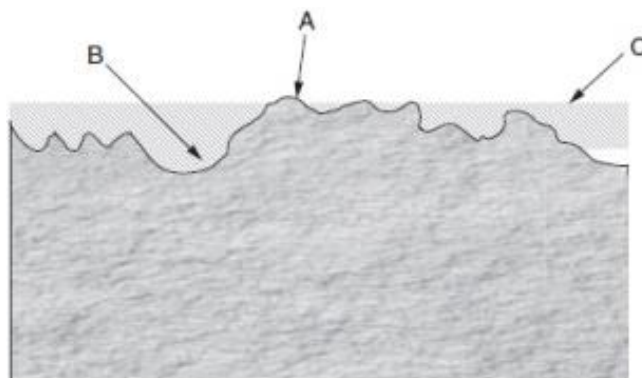


Figura 72 - Perfil substrato [14]

Diversos equipamentos surgem para a caracterização dos perfis dos substratos, principalmente para a verificação de espessuras dos revestimentos. Medições frequentes por pessoal especializado podem dar uma boa estimativa estatística das espessuras gerais e controlar se estas atingem os valores a cumprir.

Os ensaios onde são utilizados os equipamentos podem ser classificados como métodos destrutivos e não destrutivos independentemente do tipo de revestimento. Muitos dos tipos de ensaios estão presentes nas normas NP EN ISO 2409, e NP EN ISO 2808.

Os ensaios mais utilizados são os não destrutivos de medição de espessura pela sua simplicidade e eficácia e incluem:

- Medidor películas secas (Figura 73);
- Medidor de películas húmidas (revestimentos orgânicos);
- Medidores de fluxo magnético (Figura 74).



Figura 73 - Medidor de espessura de película seca (Elcometer)

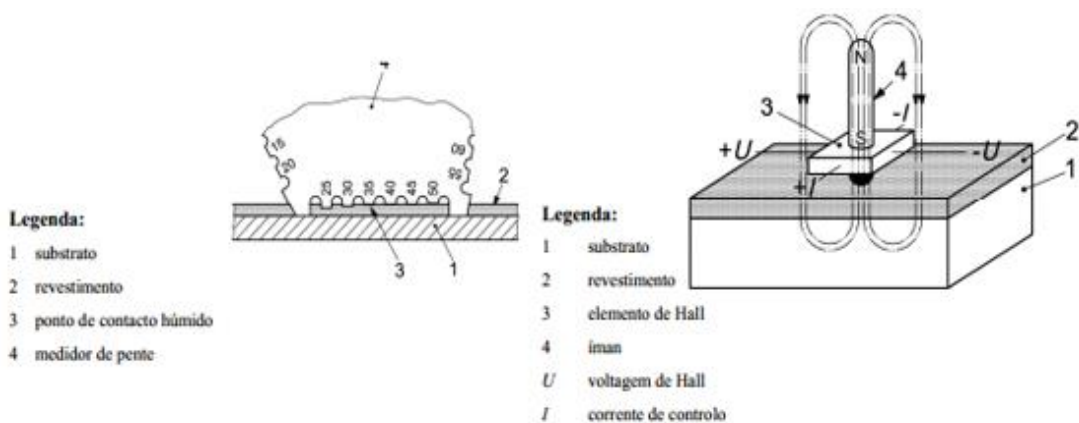


Figura 74 - Tipos de medidores, película húmida (esquerda), fluxo magnético (direita) [29]

Nos sistemas de pinturas anticorrosivas, a verificação de espessura da película húmida pode ser efetuada entre camadas em pontos diferentes através do medidor de películas húmidas sendo que a espessura depende do volume de sólidos do produto aplicado. Esta medição dá um controlo inicial da espessura do revestimento. As camadas não devem ser aplicadas sem a verificação de temperaturas que inferem diretamente no ponto de orvalho e humidade relativa para averiguação destes estarem abaixo dos valores que garantem as melhores condições de aderência (< 80% HR). A temperatura do metal deve ser também controlada na aplicação deste tipo de revestimento dependendo da utilização pretendida (Figura 75).



Figura 75 - Medidor espessura húmida (esquerda), medidor de temperatura do metal (centro), dispositivos de medição para ponto orvalho e humidade relativa (direita)

As zonas classificadas como altamente corrosivas devido à proximidade de zonas costeiras ou com provável contacto com cloretos, são também alvo de testes para verificação dos valores de concentração de cloretos para o controlo destes estarem abaixo do limite tolerável (Figura 76).



Figura 76 - Teste de concentração de cloretos [31]

4.4.6 - Preparação das superfícies metálicas

Na preparação das superfícies a aplicar o revestimento é indubitavelmente um dos fatores a ter em conta. A Norma ISO 8501 parte 1, 2 e 3 descrevem os processos mais indicados de limpeza dos substratos dependendo do grau de corrosão (A, B,C, D) presente em aço sem revestimento (Figura 77).



Figura 77 - Padrões fotográficos do grau de oxidação [30]

Estes e outros pormenores podem ser consultados no Anexo 2.

Também na mesma norma (parte 2) surgem padrões fotográficos de substratos previamente revestidos em estado de oxidação para comparação com a Figura 78.

Esta parte da norma baseia-se na experiência de que nem sempre é necessário a eliminação total do revestimento anterior. Isto é relevante quando existem trabalhos de manutenção efetuados em intervalos regulares de tempo.

Cada grau de limpeza designa-se pelas letras correspondentes "Sa", "St" que indicam o tipo de método de limpeza utilizado. A letra "P" situada em frente do grau de limpeza indica uma limpeza localizada.

O grau de limpeza do substrato é importante na eficácia e durabilidade de um revestimento por sistema de pintura anticorrosiva ou outro. O grau de limpeza e a espessura do revestimento são os parâmetros que mais contribuem para a durabilidade e podem influenciar diretamente na necessidade de intervenções periódicas e o intervalo a que estas se devem proceder. Porém, a limpeza do substrato por vezes é condicionada por outros fatores como localização, acessibilidade, economia, que nem sempre permitem o uso das opções mais eficazes.



Figura 78 - Padrões fotográficos de comparação para substratos com diversos graus de oxidação após limpeza [30]

4.4.7 - Avaliação da degradação na estrutura

Todos os revestimentos sofrem uma degradação ao longo do tempo independentemente da exposição a que estão sujeitos. As anomalias mais comuns para sistemas de pintura anticorrosiva são:

- Empolamento (perda de aderência);
- Enferrujamento;
- Fissuração;
- Descamação;
- Pulverulência (perda de película).

Os graus dos defeitos em revestimentos por sistemas de pintura são definidos por comparação com as anomalias existentes na estrutura através de padrões fotográficos de referência presentes na norma NP EN ISO 4628 (Figura 79). Esta norma determina que o grau de Enferrujamento Ri3 como sendo o limite ou o fim da durabilidade de um sistema de pintura, sendo aconselhável manutenção. Logo, o grau de enferrujamento tende a ser usado para controlo da necessidade de manutenção de estruturas.

Para uma descrição mais completa do grau de enferrujamento, podem ser apresentados segundo a sua densidade (Ri) e dimensão das células de corrosão (S) (Figura 80). A classificação da dimensão da célula de corrosão (S) não surge como limite para manutenção segundo a norma. Para efeitos de apresentação, a classificação da densidade deve ser precedida pela letra (S) referente a classificação da dimensão. Os defeitos de classificação 0 são considerados na ausência de alterações e os defeitos de classificação 5 são de tal forma graves que uma alteração adicional não tem qualquer significado (Anexo 3).

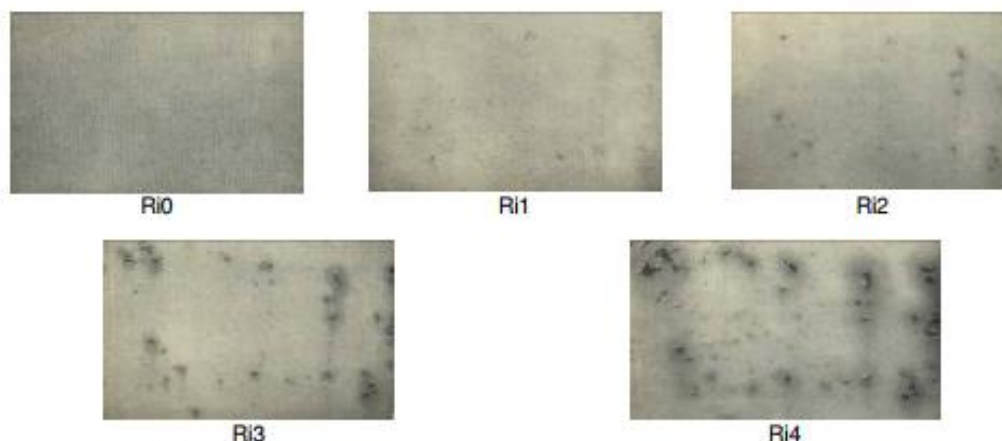


Figura 79 - Padrões fotográficos para avaliação o grau de enferrujamento [32]

ISO	Escala Europeia	ASTM	% área oxidada
Ri0	Re0	10	0
Ri1	Re1	9	0,05
Ri2	Re2	7	0,5
Ri3	Re3	6	1
Ri4	Re5	4	8
Ri5	Re6	1 a 2	40/50

<u>Densidade (Ri)</u>		<u>Tamanho (S)</u>
<u>ISO</u>	<u>ASTM</u>	<u>ISO</u>
0	Nenhuma	
1	Escassa	1 x 10 aumentos
2	Pouca	visíveis
3	Media	até 0,5mm
4	Media-Alta	4 0,5-5mm
5	Alta	> 5 mm

Figura 80 - Critério de avaliação dos defeitos (Adaptado de [32])

A mesma norma (NP EN ISO 4628) recomenda que a zona a reparar deve ser multiplicada por 10 em casos de corrosão dispersa e por 2 em situação de corrosão localizada. Outra recomendação surge para graus enferrujamento inferiores a Ri 4 onde podem ser efetuadas reparações locais. Em casos de graus iguais ou superiores, recomenda-se a reparação total da zona e reposição de todo o sistema de pintura [14;30;31;32].

5

CASO PRÁTICO

Neste capítulo são apresentados os resultados de uma estrutura que foi sujeita a uma intervenção de reabilitação total onde foi aplicado um revestimento anticorrosivo por sistema de pintura. Alguns dos parâmetros foram medidos na altura da intervenção (2010) e outros numa fase posterior (2017), tendo por objetivo a verificação e comparação de alguns desses parâmetros como a degradação ao longo do tempo deste tipo de revestimento. Posteriormente, serão comparados esquemas de intervenção realçando as principais diferenças entres estes. A estrutura a analisar por ser de elevada relevância, o seu bom funcionamento e durabilidade e estética devem ser tidos em conta.

Com estes resultados pretende-se fazer estimativas utilizando alguns ensaios presentes nas normas e de outros resultados obtidos. Com os resultados dos ensaios recentes como grau de enferrujamento e pulverulência, de modo a obter uma melhor previsão, foram efetuadas várias comparações e aplicada uma média dos cinco piores resultados de sete ensaios tal como apontado na norma. Esta metodologia deve-se ao fato de estes graus de degradação serem classificados através de padrões fotográficos unitários, o que pode levar a um desvio elevado da realidade. Por outro lado, por simplificação ou simplesmente por falta de mais dados, algumas das previsões podem ter sido linearizadas.

5.1 - Ponte de S. Vicente

A nova Ponte de S. Vicente é do tipo “Bowstring”, composta por dois tramos com dois arcos metálicos (S355 J2) inclinados por cada tramo de seção tubular 508mm (20 polegadas) de diâmetro, com a corda de cada arco de cerca de 31 metros e uma altura máxima de seis metros no respetivo plano de desenvolvimento somado a duas barras de suspensão centrais. Esta ponte foi executada em 2002 e teve um orçamento global inicial de 1.25M€ sendo que cerca de 17% do valor foram aplicados na construção da estrutura metálica que suporta a ponte e os respetivos tratamentos anticorrosivos. Esta nova estrutura (Figura 81) veio substituir a antiga (Figura 82) que já não era apropriada para o tráfego rodoviário ali existente [33].

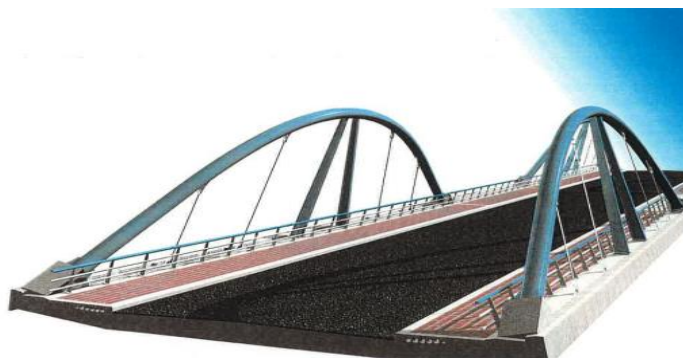


Figura 81 - A nova Ponte de São Vicente [33]



Figura 82 - Antiga Ponte de S. Vicente [34]

Após 8 anos da sua construção, a estrutura metálica foi alvo de reabilitação, pois apresentava alguns sintomas de corrosão muito localizada (Figura 83) principalmente nas faces viradas para Norte muito provavelmente pela maior deposição de cloretos provenientes do mar.



Figura 83 - Apresentação de corrosão na estrutura

5.2 - Estado geral e tratamento da estrutura metálica 2010

A estrutura metálica apresentava sintomas de corrosão muito localizada em diversas áreas da sua superfície. Através de uma análise mais aprofundada foi caracterizada segundo a Tabela 11:

Tabela 11 - Caracterização da estrutura (2010)

Categoria de exposição	C5-M
Grau de enferrujamento (ISO 4628-3)	Ri4 (S5)
Fotodegradação	Sim

A estrutura apresentava um grau de degradação elevado o que determinou uma limpeza geral do substrato a jato abrasivo de grau Sa 2 ½ e reposto todo o sistema de pintura. Para garantir o melhor tratamento possível à estrutura, foi contemplado o esquema apresentado na Tabela 12:

Tabela 12 - Esquema contemplado

Grau de limpeza (ISO 8501-1)	Sa 2 ½
Sistema de pintura (ISO 12944-5)	A5M.05 ENPS (240µm)
Tempo de garantia	5 Anos
Tempo de vida útil	5 a 15 Anos

Os tipos de grau de limpeza do substrato podem ser consultados na Figura 78 e os sistemas de pintura podem ser consultados no Anexo 1. O tempo de garantia e tempo de vida útil que surgem na tabela anterior são reais mas, para este trabalho, são meramente informativos.

O esquema (Tabela 13) foi aplicado “in situ” a rolo e trincha após verificadas as boas condições de limpeza e desengorduramento das superfícies por produtos da marca “CIN”.

Tabela 13 - Sistema de pintura

Sistema de pintura	ENPS ¹³ (µm)	Nº camadas
Epoxy c/Ferro Micáceo	65	1
Epoxy Poliamida HB	125	1
Poliuretano	50	1

O trabalho de reabilitação foi faseado pois as condições atmosféricas e a presença quase constante de elevados teores de cloretos provenientes do mar não permitiam avanços consideráveis. Este teve início em meados de Agosto de 2010 e teve o seu término no fim de Dezembro do mesmo ano.

5.3 - Medição espessura do revestimento (2010)

Durante toda a intervenção em 2010, foram efetuadas medições EPS¹⁴ de cada camada aplicada de forma a garantir o cumprimento do esquema. Porém, só são apresentados alguns dos EPS totais de pontos previamente apontados para controlo Tabela 14.

¹³ Espessura Nominal de Película Seca (Espessura mínima obrigatória)

¹⁴ Espessura Película Seca (Espessura real medida).

Tabela 14 - Medições EPS de 2010

MEDIÇÃO EPS (total)		
PONTO:	Nº medições	(μm)
Base Direita	1	385,0
Base Esquerda	1	369,0
Base Topo	1	366,0
Base Inferior	1	258,0
Tubo (Ponto baixo) direita	1	269,0
Tubo (Ponto intermédio) direita	1	287,0
Tubo (Ponto topo) direita	1	290,0
Tubo (Ponto baixo) esquerda	1	255,0
Tubo (Ponto intermédio) esquerda	1	249,0
Tubo (Ponto topo) esquerda	1	301,0
Perfil alma(Ponto baixo) direita	1	258,0
Perfil alma(Ponto intermédio) direita	1	278,0
Perfil alma(Ponto elevado) direita	1	302,0
Perfil alma(Ponto baixo) esquerda	1	289,0
Perfil alma(Ponto intermédio) esquerda	1	299,0
Perfil alma(Ponto elevado) esquerda	1	249,0
Aba Norte (Ponto baixo)	1	360,0
Aba Norte (Ponto intermédio)	1	325,0
Aba Norte (Ponto topo)	1	355,0
	Média:	302,3

Os valores enquadraram-se nas recomendações dadas pela EN NP ISO 12944-5 segundo a Tabela 15:

Tabela 15 - Recomendações ISO 12944-5

A média aritmética de EPS deve ser \geq a ENPS	$302,3 \mu\text{m} \geq 240 \mu\text{m}$	Ok
Os valores EPS individuais devem ser $\geq 80\%$ ENPS	Mínimo dos valores ($249 \mu\text{m}$) $\geq 0,8 \cdot 240 \mu\text{m}$	Ok
OS valores EPS individuais devem ser \leq as espessuras máximas recomendadas ($3 \cdot \text{ENPS}$ ou especificado pelo fabricante)	Máximo dos valores ($385 \mu\text{m}$) $\leq 3 \cdot 240 \mu\text{m}$	Ok

5.4 - Estado atual da Ponte S. Vicente (2017)

As medições em 2010 foram unitárias logo, não foi obtido um resultado estatístico. As novas medições (2017) foram garantidos resultados estatísticos com 6 medições em cada ponto, garantindo que há probabilidade de pelo menos 68% do valor real estar dentro do intervalo {Média \pm desvio padrão}.

Tabela 16 - Medições EPS para comparação 2017

MEDIÇÃO EPS (total)	Nº medições	Média (µm)	Desvio padrão (µm)	Coef. De variação (%)
PONTO:				
Base Direita	6	456,8	54,7	12,0
Base Esquerda	6	401,3	29,5	7,3
Base Topo	6	415,3	24,1	5,8
Base Inferior	6	304,0	28,7	9,4
Tubo (Ponto baixo) direita	6	281,2	15,9	5,7
Tubo (Ponto intermédio) direita	6	235,0	18,8	8,0
Tubo (Ponto topo) direita	6	242,7	17,1	7,1
Tubo (Ponto baixo) esquerda	6	264,3	18,7	7,1
Tubo (Ponto intermédio) esquerda	6	262,7	20,8	7,9
Tubo (Ponto topo) esquerda	6	267,7	13,8	5,2
Perfil alma (Ponto baixo) direita	6	277,7	13,2	4,8
Perfil alma (Ponto intermédio) direita	6	242,2	13,2	5,4
Perfil alma (Ponto elevado) direita	6	247,8	7,9	3,2
Perfil alma (Ponto baixo) esquerda	6	330,3	18,1	5,5
Perfil alma (Ponto intermédio) esquerda	6	260,0	9,3	3,6
Perfil alma (Ponto elevado) esquerda	6	212,3	9,9	4,7
Aba Norte (Ponto baixo)	6	397,8	12,5	3,1
Aba Norte (Ponto intermédio)	6	357,8	21,3	6,0
Aba Norte (Ponto topo)	6	287,3	22,5	7,8
	Média:	302,3		

Ao verificar os valores, é de fácil constatação que algumas das medições estão mais elevadas que as anteriores (2010). Isto deve-se a uma ligeira intervenção localizada (P) a que a ponte foi sujeita antes do fim do período de garantia (2015) onde esta já apresentava grau enferrujamento Ri 2 (S4). Nesta ligeira intervenção, apenas pontos mais suscetíveis como bases e ligações foram reparados e podem induzir em erro dando a impressão que o revestimento não sofreu desgaste. Na Tabela 17 é apresentada a média da perda de película mas apenas das medições dos pontos onde não houve intervenção. Todavia, a estrutura, no período atual, já apresenta ligeiros danos por corrosão em alguns dos pontos mais suscetíveis.

5.4.1- Grau de degradação no período atual (2017)

Os graus atuais de enferrujamento (Figura 84) e pulverulência foram obtidos através de padrões fotográficos pela média de diversas observações de modo a obter resultados o mais realista possíveis. Alguns parâmetros sobre o grau de enferrujamento foram apresentados na subseção acima. O grau de enferrujamento é apresentado na Tabela 17.

O grau de pulverulência foi também foi estimado através da média de cinco ensaios pelo método da fita adesiva presente na norma EN NP ISO 4628-6 sobre um fundo branco e comparado aos padrões fotográficos existentes na norma.

Este ensaio consiste na colocação de uma fita adesiva sobre o revestimento e posterior comparação de modo a verificar da degradação dos constituintes do revestimento. Os pormenores dos ensaios podem ser consultados no (Anexo 4).



Figura 84 - Grau de enferrujamento

Por existirem indícios de dois tipos de intervenção na estrutura (Figura 85), foram efetuados ensaios para dois anos (Figura 86) de degradação (2015 a 2017) e sete anos (Figura 87) de degradação (2010 a 2017), utilizando-se os dados para obter a função que mais se ajusta aos dados obtidos pela medição direta, admitindo as condições são as mesmas.

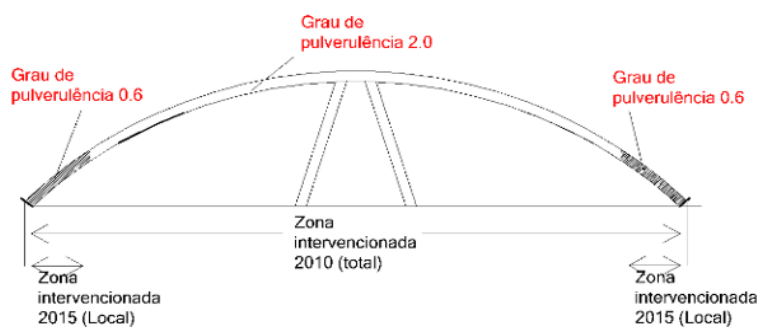


Figura 85 - Representação das diferentes intervenções na estrutura

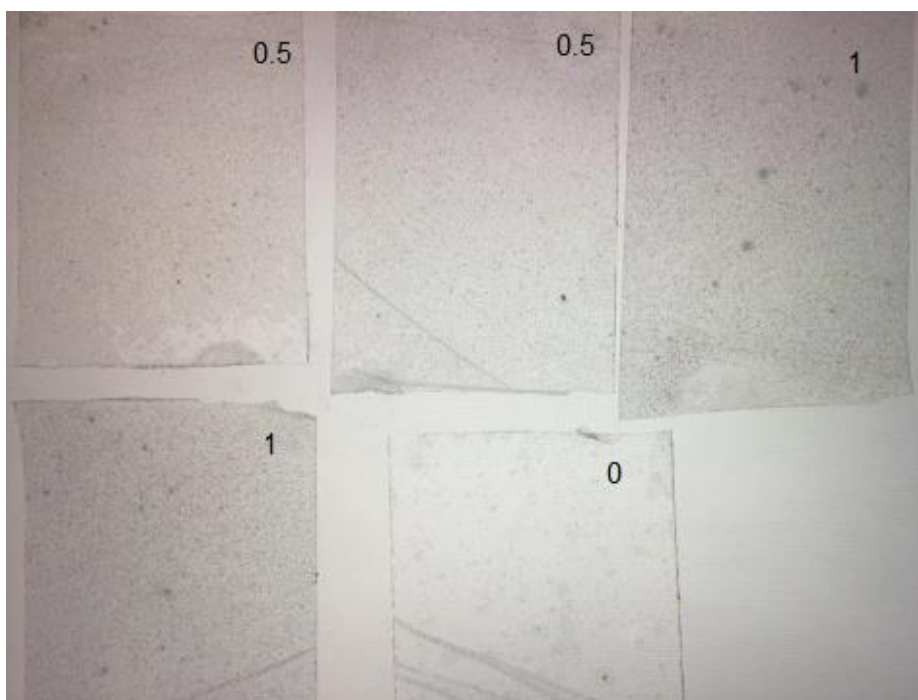


Figura 86 - Grau de pulverulência aos 2 anos

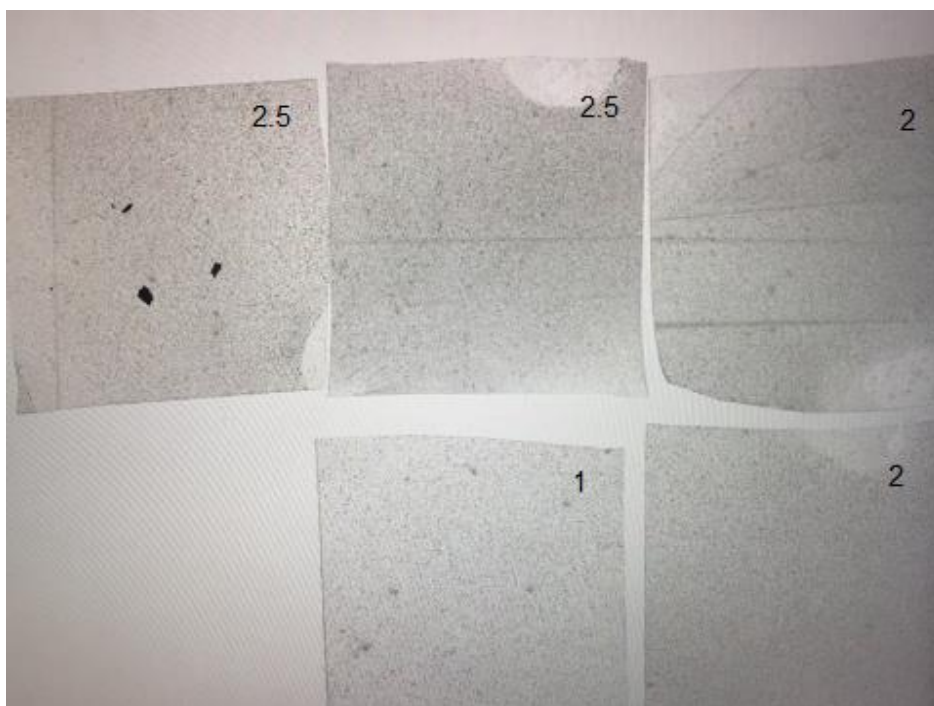


Figura 87 - Grau de Pulverulência aos 7 anos

A média dos graus foram 0.6 e 2 para os anos dois e sete respectivamente.

Através dos ensaios foi encontrada a função que melhor se enquadra nos pontos verificados (Figura 88). Através de uma linearização, foram obtidos os valores para a perda espessura em anos intermédios.

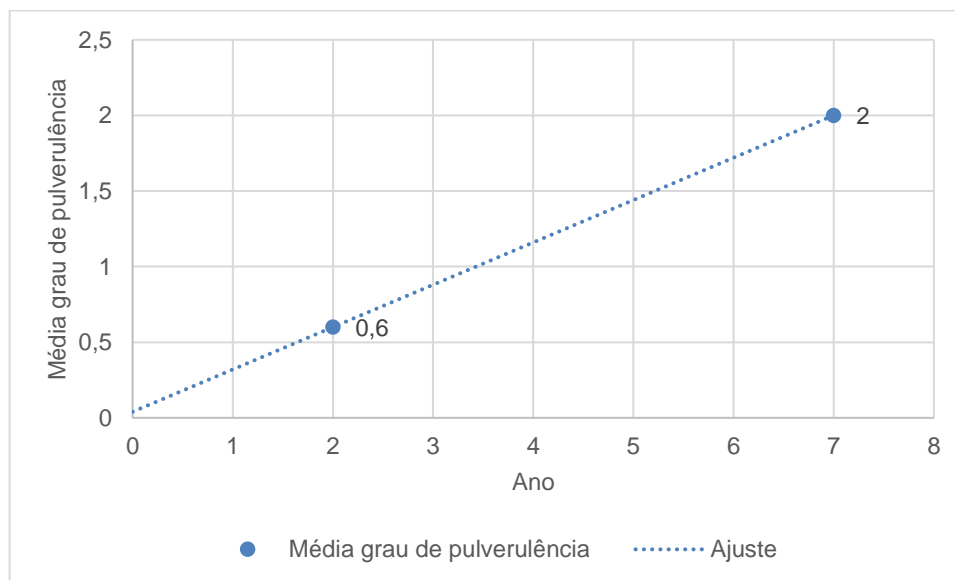


Figura 88 - Estimativa da função para grau de pulverulência

Portanto, em 2017 são apresentados dois graus de pulverulência (Tabela 17).

Tabela 17 - Caracterização da estrutura 2017

Categoria de exposição	C5-M
Grau de enferrujamento (ISO 4628-3)	Ri 1.5 (S3)
Grau de pulvelurência (2 anos)	0,6
Grau de pulvelurência (7 anos)	2
Perda total média de Película (%)	15,47

A estrutura ainda se apresenta em estado razoável e dentro do tempo de vida útil designado. O grau de enferrujamento que define a durabilidade do sistema ainda é relativamente baixo (Ri 1.5) devido à intervenção local em 2015, antes do fim do período de garantia, mas atualmente as manchas de corrosão já apresentam alguma dimensão. Logo, intervenções periódicas potencialmente poderão manter o bom estado presente e provavelmente reduzir o custo em detrimento de longos períodos sem reparações.

5.5 - Análise de cenários de intervenção local para Ponte S. Vicente

Esta ponte apesar de estar em estado razoável, pelo seu ambiente muito corrosivo está sujeita a degradar-se muito rapidamente num curto espaço de tempo.

Nesta Seção pretende-se apresentar diferentes cenários para intervenções locais periódicas ao longo de um largo período de tempo com diferentes cenários que incluem esquemas ligeiramente distintos, visando demonstrar algumas das suas maiores diferenças. Salienta-se que em cada intervenção é aplicado um esquema e que cada cenário é composto de vários esquemas.

Pretende-se também estimar e comparar custos das diversas situações, o possível grau de degradação e intervalos admissíveis para a manutenção. Os esquemas apresentados foram ponderados através da experiência e tentam apresentar um ponto de vista o mais real possível.

Para diferenciação de custos entre esquemas, é introduzido um sistema de pontos que é utilizado na prática por algumas empresas sendo que a cada tarefa é aplicada um número de pontos/m e o seu total multiplicado por um fator que os converte em custos por metro linear (€/m). O fator de multiplicação pode ser variável dependendo de diversos fatores como o custo do material e outros fatores relativos à atualização de preços. Como as estimativas a apresentar são para um período considerável e os fatores aleatórios, os custos apresentados neste trabalho surgem em pontos/m para simplificação. O sistema de pontos apenas considera os trabalhos efetuados em estaleiro ou sem acréscimo de valor para deslocação de equipamento e pessoal.

5.5.1 - Estimativa do grau de enferrujamento em função do tempo

Para obter uma previsão do grau de enferrujamento, foram utilizados os dados existentes da degradação da estrutura após uma limpeza de substrato de grau Sa 2 ½ e obtidas as funções que mais se adequam. Os dados considerados são apresentados na Tabela 18:

Tabela 18 - Dados para estimativa do grau enferrujamento com grau Sa 2 ½

Ano dos dados considerados	2010	2015	
	2002		2010
Grau de limpeza do substrato	Sa 2 ½	Sa 2 ½ Ponto intermédio	Sa 2 ½ Fim do esquema inicial
Ano	0	5	8
Ri	0	2	4
S	0	4	5

Através dos dados obteve-se as funções que mais se adequam aos pontos. As funções são apresentadas na Figura 89.

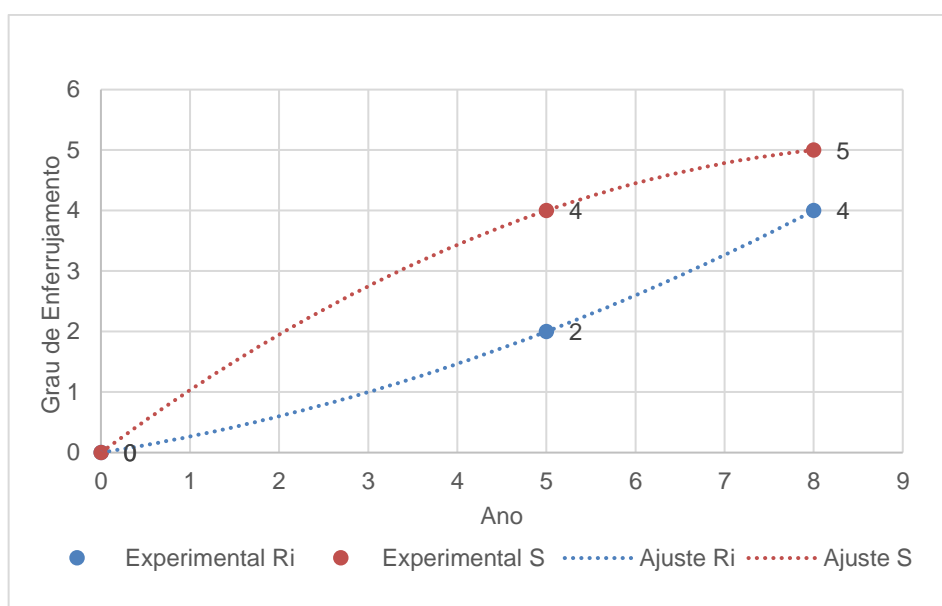


Figura 89 - Estimativa do grau de enferrujamento após limpeza substrato grau Sa 2 ½

Salienta-se que em 2015 a estrutura foi intervencionada de forma local onde foram reparadas pequenas seções da ponte através de limpeza do substrato de grau (P) St3 e repintadas apenas as mesmas seções. No entanto, a intervenção local de 2015 apenas serve para estimativa do comportamento do esquema ao longo do tempo e não foi considerada como efetiva nos cenários seguintes. Logo, a estrutura atualmente apresenta-se com 2 tipos de limpeza de substrato o que permitiu uma medição direta dos seus graus de enferrujamento e em períodos diferentes.

De forma a obter uma estimativa para o enferrujamento após uma limpeza de grau St3, utilizou-se os seguintes dados apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Dados para estimativa do grau enferrujamento com grau St3

Ano dos dados considerados	2015	2017
Grau de limpeza do substrato	St3	St3 Ponto intermédio
Ano	0	2
Ri	0	1,5
S	0	3

Devido a escassez de mais dados com o grau de limpeza St3, optou-se por considerar um comportamento linear para o grau de enferrujamento como pode ser observado na Figura 90.

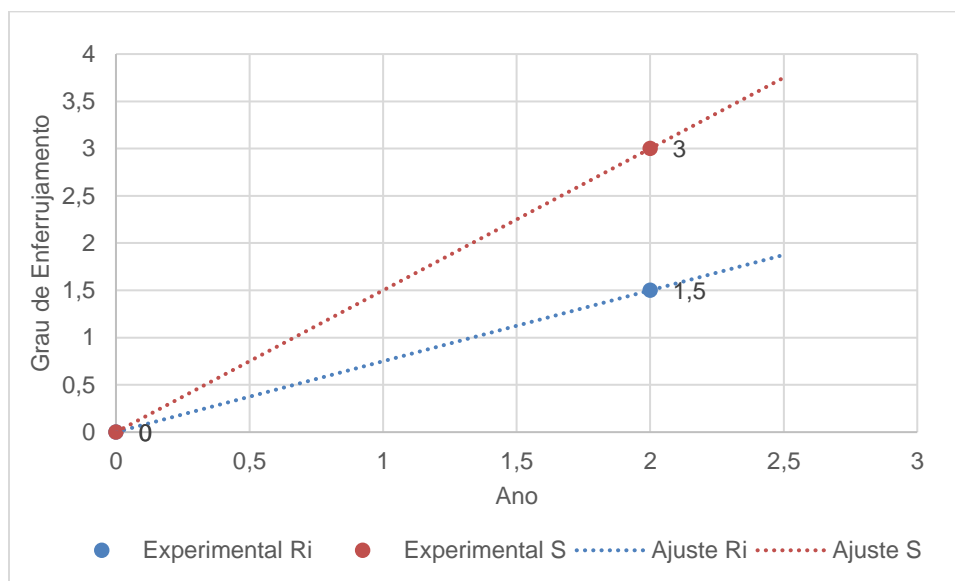


Figura 90 - Estimativa do grau de enferrujamento após limpeza substrato grau St3

5.5.2 - Estimativa dos custos através do sistema de pontos para intervenções locais

Seguidamente são apresentadas as estimativas de custos para esquemas locais que apesar de terem muitas semelhanças, o grau de limpeza do substrato surge como o grande diferenciador. São apresentados dois esquemas para intervenções locais (P) para a estrutura. O sistema de pintura a considerar, de modo a permitir uma comparação fiável, é o considerado na Tabela 13.

Tabela 20 - Esquemas locais para manutenção

Esquema 1 (Local)	Esquema 2 (Local)
Limpeza P St3	Limpeza P S2 ½
Desengorduramento	Desengorduramento
Lixagem	Lixagem
Sistema de pintura	Sistema de pintura

Os esquemas 1 e 2 (Tabela 20) são os mais indicados para manutenções periódicas aquando da estrutura atingir o grau Ri3, sendo este o limite de enferrujamento indicado pela norma EN NP ISO 4628-3 para uma nova intervenção local para pintura de manutenção. As intervenções locais tendem a incluir a limpeza do substrato metálico apenas nas áreas que apresentam corrosão multiplicando a área por 10. Estes valores podem ser verificados na Figura 80. Após a limpeza do substrato o sistema de pintura é aplicado através de camadas de proteção de forma local terminando com uma camada geral de acabamento em toda a estrutura para selamento do revestimento ($\approx 50\mu\text{m}$).

As estimativas de custo para os esquemas 1 e 2 mais propícios para a manutenção são apresentados nas Tabela 21 e Tabela 22.

Os esquemas são muito similares e apenas diferem no grau de limpeza do substrato sendo que o esquema 2 apresenta um valor superior em cerca de 23% do esquema 1.

Tabela 21 - Estimativa de custo para Esquema 1

MAPA GERAL DE TRABALHOS				QUANTIDADES (Un)	IMPORTÂNCIAS (Pontos)
Art.	Designação de Trabalhos	Un.	Preço unitário (pontos/m)	Prevista	Prevista
1.	Limpeza de substrato metálico de tubo (20") de Grau St3 para grau de enferrujamento Ri 3 (10% área) em estaleiro	m	199,0	12,4	2467,6
1.1	Custo da operação	Vg	16356,0	1,0	16356,0
Total do capítulo (Pontos)					18823,6
2.	Pintura Anticorrosiva				
2.1	Desengorduramento entre camadas	m	48,0	161,2	7737,6
2.2	Lixagem entre camadas	m	48,0	148,8	7142,4
2.3	Aplicação Primário Epóxi C/ferro micáceo	m	223,0	12,4	2765,2
2.4	Aplicação Primário Epóxi poliamida HB	m	175,0	12,4	2170,0
2.5	Aplicação de Acabamento em poliuretano	m	207,0	136,4	28234,8
2.6	Custo da operação	Vg	71931,7	1,0	71931,7
Total do capítulo (Pontos)					119981,7
Total Geral (Pontos)					138805,3
Total por metro desenvolvimento (Pontos/m)					1119,4

Tabela 22 - Estimativa de custo para Esquema 2

MAPA GERAL DE TRABALHOS			QUANTIDADES (Un)	IMPORTÂNCIAS (Pontos)	
Art.	Designação de Trabalhos	Un.	Preço unitário (pontos/m)	Prevista	Prevista
1.	Limpeza de substrato metálico de tubo (20") de Grau Sa 2 ½ para grau de enferrujamento Ri 3 (10% área) em estaleiro	m	310,0	12,4	3844,0
1.1	Custo da operação	Vg	50084,3	1,0	50084,3
Total do capítulo (Pontos)					53928,3
2.	Pintura Anticorrosiva				
2.1	Desengorduramento entre camadas	m	48,0	161,2	7737,6
2.2	Lixagem entre camadas	m	48,0	148,8	7142,4
2.3	Aplicação Primário Epóxi C/ferro micáceo	m	223,0	12,4	2765,2
2.4	Aplicação Primário Epóxi poliamida HB	m	175,0	12,4	2170,0
2.5	Aplicação de Acabamento em poliuretano	m	207,0	124,0	25668,0
2.6	Custo da operação	Vg	71931,7	1,0	71931,7
Total do capítulo (Pontos)					117414,9
Total Geral (Pontos)					171343,2
Total por metro desenvolvimento (Pontos/m)					1381,8

5.5.3 - Apresentação do Cenário A

Através das estimativas obtidas na estrutura para o grau de enferrujamento com os 2 esquemas, é possível prever a degradação da estrutura ao longo do tempo para cada um dos esquemas e aproveitando os dados também obtidos para os custos, pretende-se efetuar uma comparação para a verificação do esquema mais eficaz.

O Cenário A é composto por diversas intervenções locais através do esquema 1 quando da estrutura atingir o grau de enferrujamento Ri3 entre 2010 e 2060 segundo a Figura 91. A 1ª intervenção apresentada é total no entanto, é contabilizada para uma melhor comparação. Os valores das intervenções totais são apresentados mais à frente.

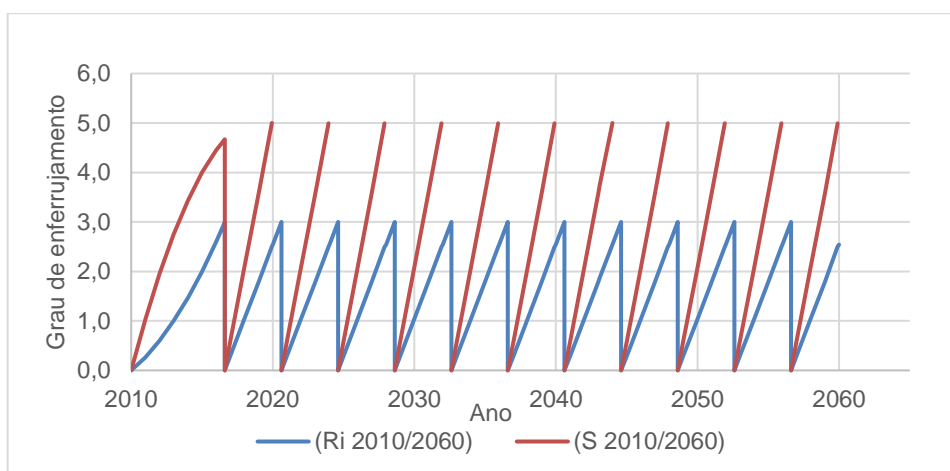


Figura 91 - Estimativa da evolução do grau de enferrujamento para cenário A (2010/2060)

5.5.4 - Apresentação do Cenário B

O Cenário B é composto por diversas intervenções através do esquema 2 até a estrutura atingir o grau de enferrujamento Ri3 (Figura 92).

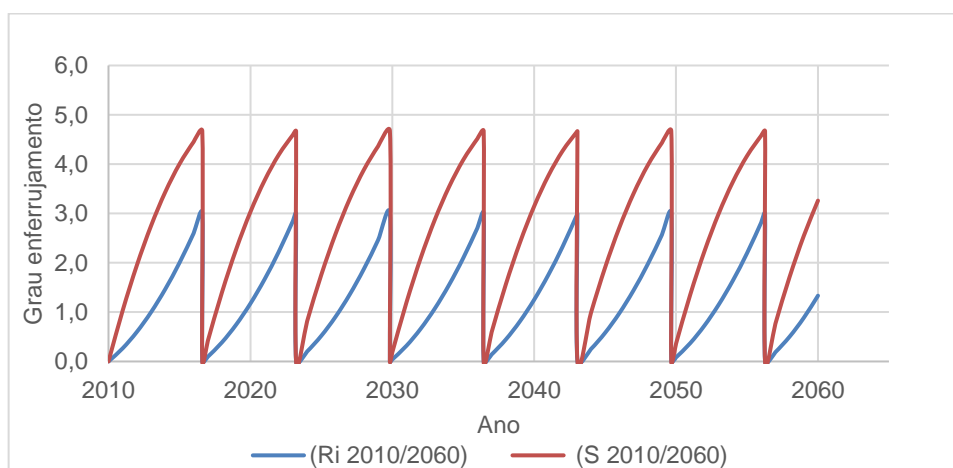


Figura 92 - Estimativa do grau de enferrujamento para Cenário B (2010/2060)

5.5.5 - Apresentação do Cenário C

O Cenário C (Figura 93) é composto de forma alternada pelo esquema 1 e esquema 2 sendo que cada esquema é implementado quando é atingido o grau de enferrujamento Ri3.

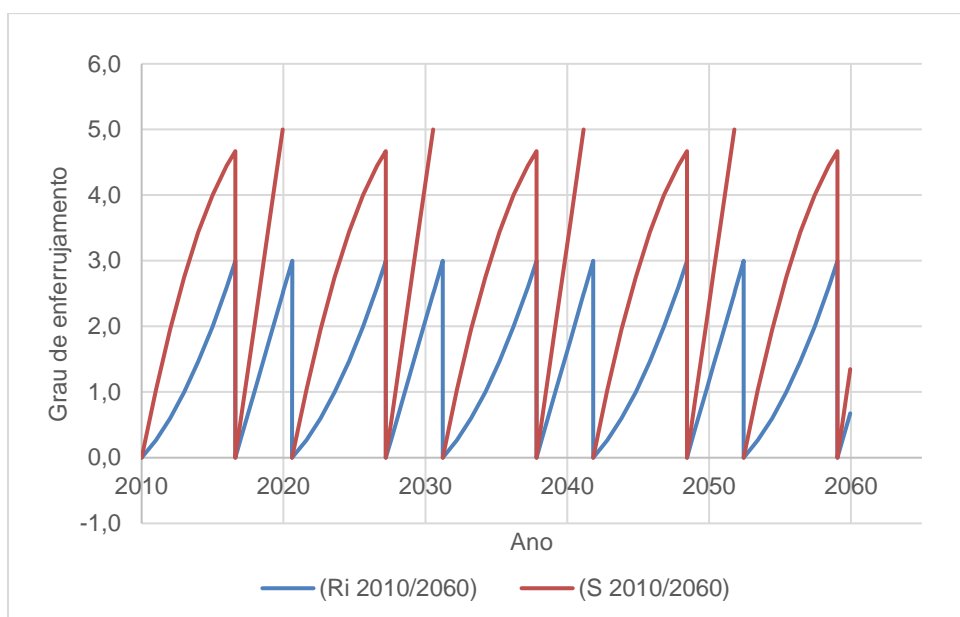


Figura 93 - Estimativa do grau de enferrujamento para Cenário C (2010/2060)

Pela estimativa de pontos por metro de desenvolvimento (pontos/m), podemos multiplicar pela quantidade de intervenções, dando um valor total para os 50 anos (Tabela 23).

Tabela 23 - Estimativa de pontos/m de intervenções locais entre 2010/2060

Cenário	Nº de intervenções	Esquemas implementados	Pontos/m estimados para 50 Anos
A	12	Esquema 1	14748.4
B	8	Esquema 2	12107.6
C	10	Esquema 1 e 2	13559.2

Da tabela anterior, é possível verificar que o cenário mais econômico é o que contempla apenas o esquema 2 que garante constantemente uma limpeza mais a fundo nas zonas afetadas pela corrosão. Esta também estima o menor número de intervenções. É também estimado que a dimensão das células de corrosão atinjam valores elevados mas inferiores aos outros cenários.

5.5.6 - Estimativa da perda de película ao longo do tempo

Por estes esquemas serem de cariz local, as zonas não afetadas pela corrosão não são sujeitas à limpeza do substrato. No entanto, devido à fotodegradação, a película está sempre a degradar-se ao longo do tempo como foi provado pelos ensaios do grau de pulverulência da Figura 88, principalmente pela exposição aos raios UV. Apesar da perda, a camada contemplada de cerca 50µm em cada intervenção, leva a um acumular de película na estrutura.

A Figura 94 apresenta, através dos dados obtidos para a perda média de espessura, admitindo as mesmas condições, com os três cenários anteriores, a estimativa da variação de espessura da película ao longo do tempo para as diferentes situações.

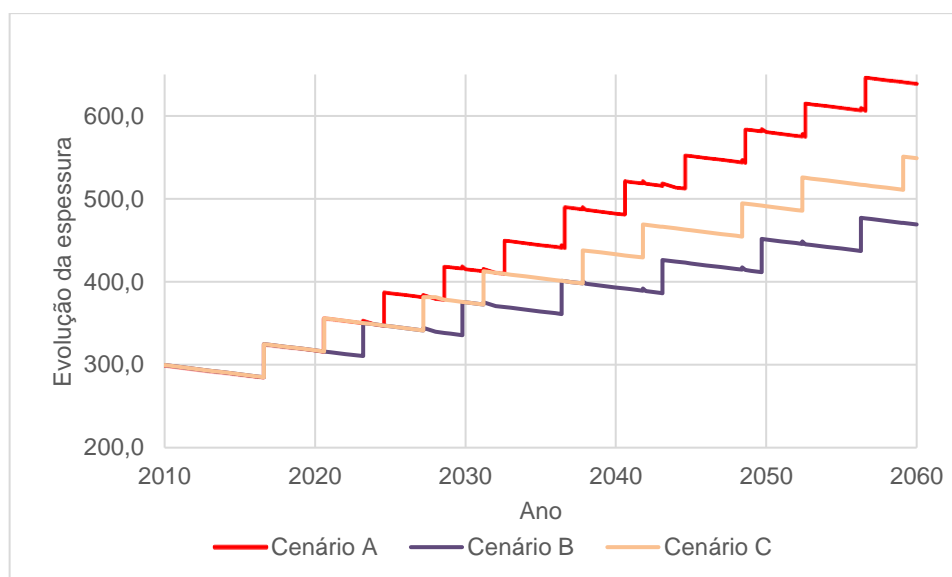


Figura 94 - Estimativa da evolução da espessura

Como se pode observar, existe um crescente aumento da espessura média do revestimento nos 3 cenários ao longo do tempo, com o cenário A a apresentar o valor mais elevado devido a ter maior número de intervenções. O cenário C fica em valores intermédios pois também apresenta número elevado de intervenções mesmo através de esquemas alternados. O cenário B constituído apenas pelo esquema 2 apresenta o valor mais baixo garantindo maior aproveitamento do revestimento.

Pelos dados obtidos para estimativa do grau de enferrujamento para os diferentes cenários prever-se haver um constante surgimento de corrosão na estrutura ao longo do tempo, mesmo com o aumento da espessura do revestimento. Logo, crê-se que é mais importante garantir uma boa limpeza do substrato metálico do que a espessura aplicada.

5.6 - Análise de cenários de intervenção total para Ponte S. Vicente

Nesta seção são apresentados cenários em que a estrutura não é intervencionada aquando desta atingir o grau enferrujamento Ri3. Neste caso assume-se que a estrutura atinge um estado em que não permite intervenções locais. Segundo a norma EN NP ISO 4628-3, o limite é o grau Ri4 e esse é o limite traçado nesta seção.

5.6.1 - Estimativa dos custos através do sistema de pontos para intervenções totais

Seguidamente é apresentada a estimativa para custos através do sistema de pontos. A estimativa para o grau de enferrujamento é o equiparado para os dois esquemas anteriores.

Os esquemas 3 e 4 apresentados na Tabela 24 são de ordem total (quando uma estrutura atinge um grau de enferrujamento Ri4) onde todo o revestimento é removido através da limpeza do substrato e é reposto todo o sistema de pintura.

Os esquemas são muito similares e apenas diferem no grau de limpeza do substrato sendo que o esquema 4 apresenta um valor superior em cerca de 19% do esquema 3.

Tabela 24 - Esquemas gerais para intervenção total

Esquema 3 (Total)	Esquema 4 (Total)
Limpeza St3	Limpeza S 2 ½
Desengorduramento	Desengorduramento
Lixagem	Lixagem
Sistema de pintura	Sistema de pintura

Os esquemas 3 e 4 são adequados a intervenções totais onde todo o sistema de pintura deve ser removido do metal. As estimativas de custos para os esquemas 3 e 4 são apresentados na Tabela 25 e Tabela 26.

Tabela 25 - Estimativa de custo para Esquema 3

MAPA GERAL DE TRABALHOS				QUANTIDADES (Un)	IMPORTÂNCIAS (Pontos)
Art.	Designação de Trabalhos	Un.	Preço unitário (pontos/m)	Prevista	Prevista
1.	Limpeza de substrato metálico de tubo (20") de Grau St3 em estaleiro	m	199,0	124,0	24676,0
1.1	Custo da operação	Vg	25792,0	1,0	25792,0
Total do capítulo (Pontos)					50468,0
2.	Pintura Anticorrosiva				
2.1	Desengorduramento entre camadas	m	48,0	496,0	23808,0
2.2	Lixagem entre camadas	m	48,0	372,0	17856,0
2.3	Aplicação Primário Epóxi C/ferro micáceo	m	223,0	124,0	27652,0
2.4	Aplicação Primário Epóxi poliamida HB	m	175,0	124,0	21700,0
2.5	Aplicação de Acabamento em poliuretano	m	207,0	124,0	25668,0
2.6	Custo da operação	Vg	87296,0	1,0	87296,0
Total do capítulo (Pontos)					203980,0
Total Geral (Pontos)					254448,0
Total por metro desenvolvimento (Pontos/m)					2052,0

Tabela 26 - Estimativa de custo para Esquema 4

MAPA GERAL DE TRABALHOS				QUANTIDADES (Un)	IMPORTÂNCIAS (Pontos)
Art.	Designação de Trabalhos	Un.	Preço unitário (pontos/m)	Prevista	Prevista
1.	Limpeza de substrato metálico de tubo (20") de Grau Sa 2 1/2 em estaleiro	m	310	124	38440
1.1	Custo da operação	Vg	59520	1,0	59520
Total do capítulo (Pontos)					97960
2.	Pintura Anticorrosiva				
2.1	Desengorduramento entre camadas	m	48	496	23808
2.2	Lixagem entre camadas	m	48	372	17856
2.3	Aplicação Primário Epóxi C/ferro micáceo	m	223	124	27652
2.4	Aplicação Primário Epóxi poliamida HB	m	175	124	21700
2.5	Aplicação de Acabamento em poliuretano	m	207	124	25668
2.6	Custo da operação	Vg	87296	1,0	87296
Total do capítulo (Pontos)					203980
Total Geral (Pontos)					301940
Total por metro desenvolvimento (Pontos/m)					2435

5.6.2 - Apresentação do Cenário D

Através das estimativas obtidas anteriormente para a estrutura relativamente ao grau de enferrujamento com os 2 esquemas, é possível prever a degradação da estrutura ao longo do tempo para cada um dos esquemas. Com os dados também obtidos para os custos nas Tabela 25 e Tabela 26, pretende-se efetuar uma comparação para verificação do mais eficaz.

O Cenário D é composto por diversas intervenções totais através do esquema 3 quando a estrutura atingir o grau de enferrujamento Ri4 entre 2010 e 2060 segundo a Figura 95.

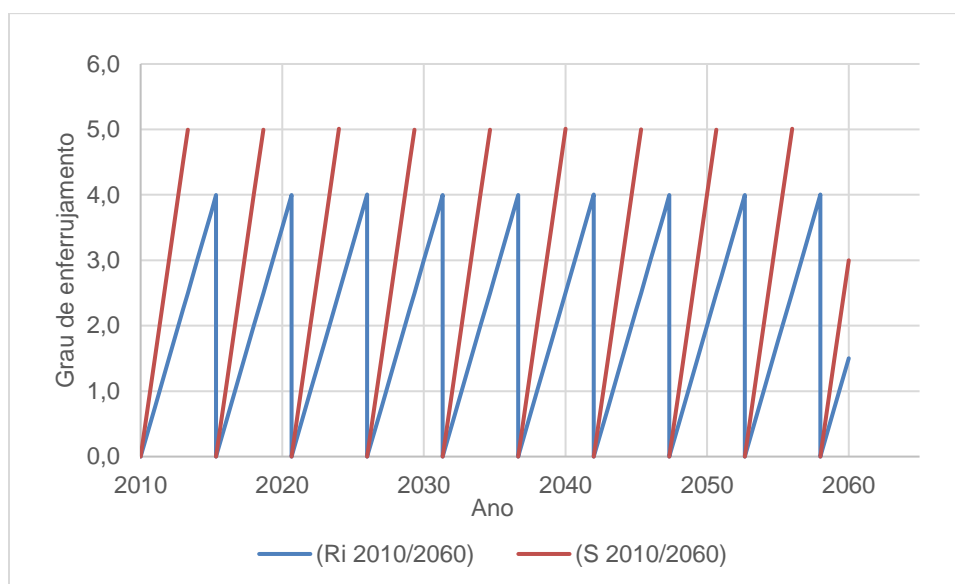


Figura 95 - Estimativa do grau de enferrujamento para Cenário D (2010/2060)

5.6.3 - Apresentação do Cenário E

O Cenário E é composto apenas pelo esquema 4 através de intervenções totais como apresenta a Figura 96.

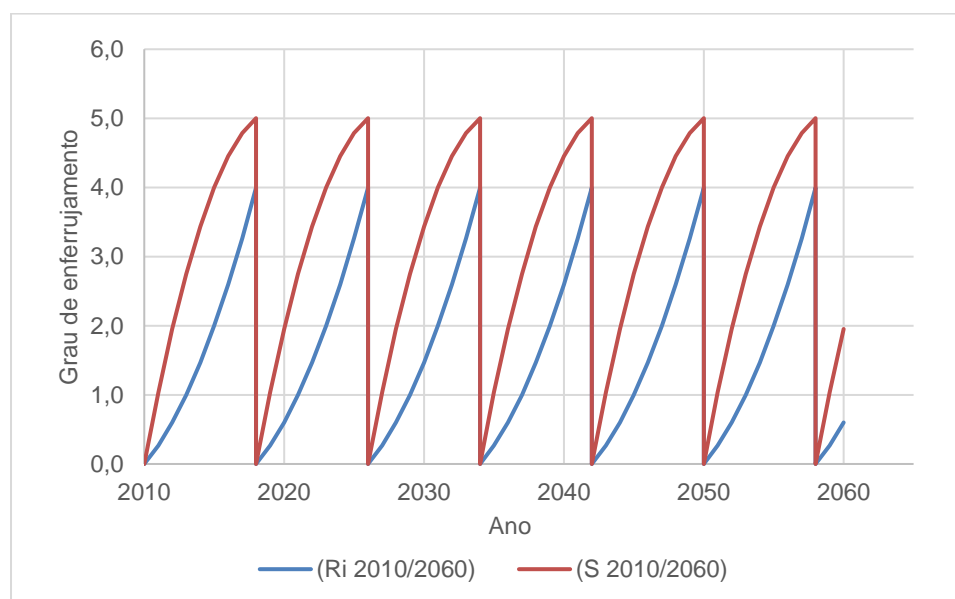


Figura 96 - Estimativa do grau de enferrujamento para cenário E (2010/2060)

5.6.4 - Apresentação do Cenário F

O Cenário F é composto de forma alternada pelo esquema 3 e esquema 4 sendo que cada esquema é implementado quando é atingido o grau de enferrujamento Ri4 (Figura 97).

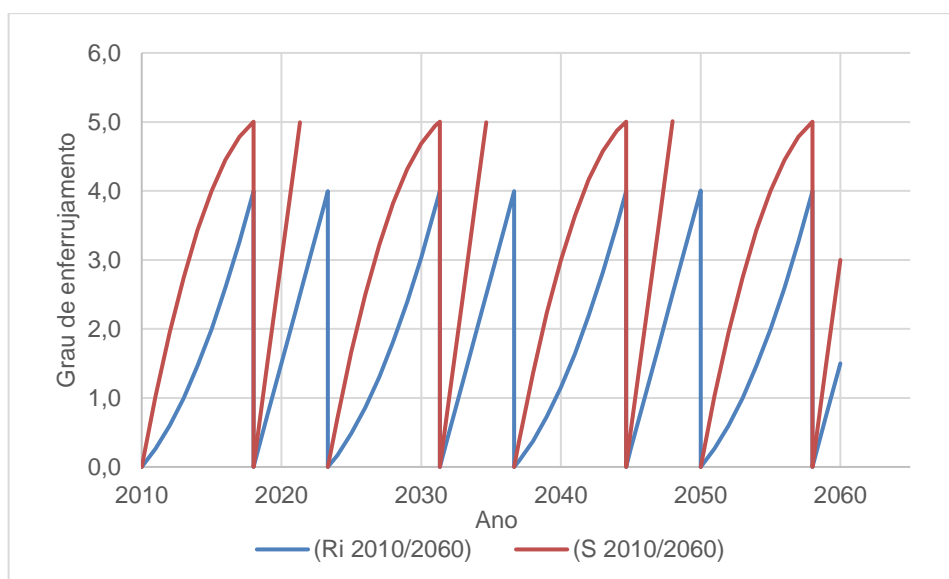


Figura 97 - Estimativa do grau de enferrujamento para cenário F (2010/2060)

Pela estimativa de pontos por metro de desenvolvimento (pontos/m), podemos multiplicar pela quantidade de intervenções, dando um valor total para os 50 anos (Tabela 27).

Tabela 27 - Estimativa de pontos/m para intervenções totais entre 2010/2060

Cenário	Nº de intervenções	Esquemas implementados	Pontos/m estimados para 50 Anos
D	10	Esquema 3	20520,0
E	7	Esquema 4	17045,0
F	8	Esquema 3 e 4	17948,0

Segundo os dados obtidos na Tabela 27, o cenário mais económico surge com pouca diferença entre o Cenário E e o Cenário F sendo que, o Cenário E contempla menos intervenções e estima-se que a dimensão das células de corrosão atinjam valores limite em ambas situações. O Cenário D surge como o mais custoso e com mais intervenções.

Os resultados obtidos apontam que a limpeza do substrato de maior qualidade que é constante no Cenário E através do esquema 4, apesar de apresentar um valor mais elevado por intervenção, acaba por ser a solução mais económica a longo prazo.

5.7 - Comparação dos diferentes cenários através do sistema de pontos

Nesta seção pretende-se comparar todos os cenários, sejam locais ou totais anteriormente apresentados de modo a alcançar de entre estes a solução ótima para a estrutura. Na contagem das intervenções de cenários de A, B e C de cariz local não foram contabilizados a primeira intervenção (2010) por ser de ordem total. Para obtenção dos valores dos pontos/m totais para 50 anos são adicionados nestes 3 cenários a intervenção inicial da Tabela 26. A Tabela 28 dá uma melhor visão da disparidade de valores entre os diversos cenários por metro de desenvolvimento, desde 2010 e ao longo de sensivelmente 50 anos para uma melhor análise da posição mais vantajosa economicamente e a que melhor se enquadra ao caso particular.

Tabela 28 - Estimativa de pontos/m para todos os cenários entre 2010/2060

Cenário (Local)	Nº de intervenções	Esquemas implementados	Pontos/m estimados para 50 Anos
A	12	Esquema 4 + Esquema 1	14748,4
B	8	Esquema 4 + Esquema 2	12107,6
C	10	Esquema 4 + Esquema 1 e 2	13559,2
Cenário (Total)			
D	10	Esquema 3	20520,0
E	7	Esquema 4	17045,0
F	8	Esquema 3 e 4	17948,0

Da Figura 98 verifica-se a evolução dos custos dos diversos cenários estimados ao longo do período de 50 anos.

Da Figura 99 realça-se o menor valor obtido pelo Cenário B que contempla consecutivas intervenções locais com o grau de limpeza do substrato de melhor qualidade (esquema 2). Este cenário também é o que apresenta o segundo menor número de intervenções ao longo do período considerado e a degradação nunca atinge patamares elevados de degradação.

O Cenário C surge como o segundo mais económico com cerca de 12% de valor superior, apesar do seu número de intervenções ser mais elevado que o Cenário B. O grau de degradação da estrutura, através da dimensão das células de corrosão atingem por vezes valores máximos.

O Cenário A exibe um valor total superior em cerca de 22% do valor mais económico sendo o que contempla maior número de intervenções o que pode condicionar o propósito da existência da estrutura metálica por demasiadas vezes. A dimensão das células de corrosão são estimadas a atingirem sempre valores máximos.

O Cenário E apresenta cerca de 41% a mais do valor mais baixo. Este, apesar de apresentar o menor número de intervenções estimadas, a degradação atinge valores elevados, principalmente a dimensão das células de corrosão o que pode levar a danos muito localizados na estrutura.

Os Cenário D e F mostram os piores resultados de todos em termos de degradação. Em termos de valores, é estimado ser superior em cerca de 69% e 48% a mais do cenário mais económico.

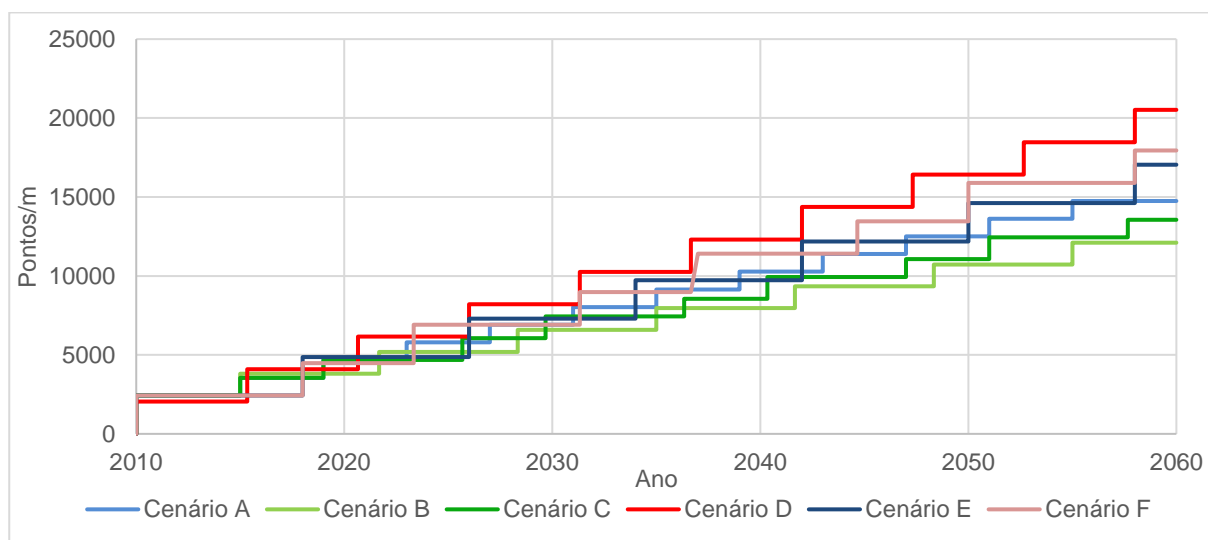


Figura 98 - Evolução da estimativa de custos ao longo do tempo

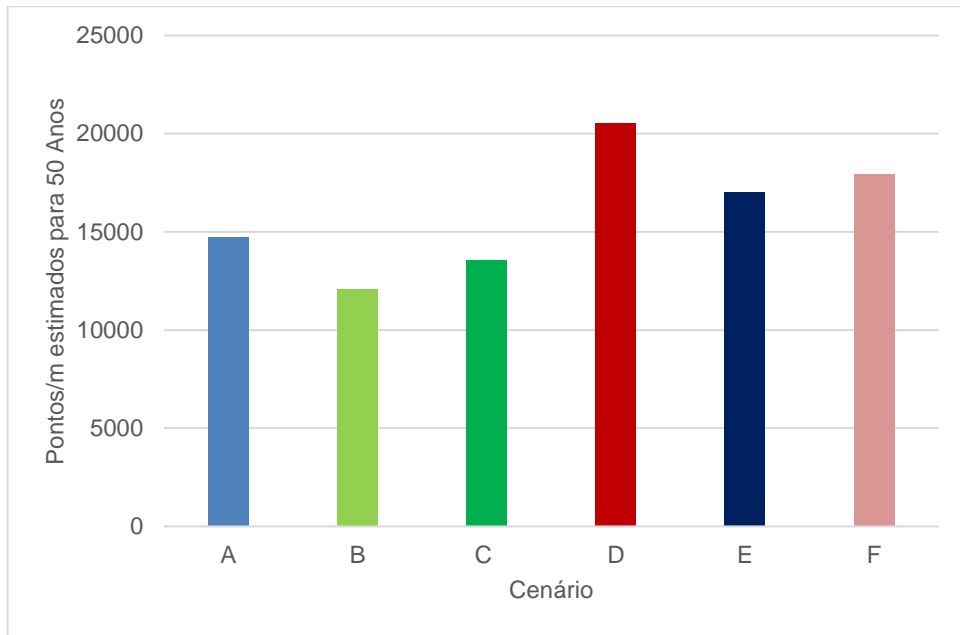


Figura 99 - Diferença final entre cenários

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O tema desta dissertação é baseado num dos problemas mais relevantes na construção civil, pois o aço ou outro qualquer tipo de liga proveniente do ferro é, de forma muito recorrente, utilizado neste ramo da engenharia seja de forma discreta ou outra mais pronunciada. Apesar das muitas formas de prevenção e proteção abordadas neste documento, apenas as proteções por revestimentos orgânicos particularmente os sistemas de pintura, foram desenvolvidos de uma forma mais elaborada, não só por serem as mais utilizadas devidas às suas qualidades (eficácia, versatilidade, estética), mas também, para explorar os motivos mais prováveis da degradação dos sistemas de pintura.

6.1 - Conclusões

A abordagem ao tema de corrosão e dos tratamentos de prevenção e proteção de estruturas metálicas dá uma visão mais minuciosa dos processos e fatores que mais influenciam este fenómeno apresentando soluções desde as mais simples até às mais elaboradas.

No caso prático estudado foi analisado de uma forma mais aprofundada apenas um dos tipos de proteção por revestimentos, atendendo às suas principais falhas e causas de degradação e estimativas de custo ao longo do tempo. Os dados obtidos são, de certa forma, por aproximação pelo facto de muitos dos fatores serem de difícil análise e a mudança de alguns parâmetros poderem levar a resultados muito diferentes.

Da análise de resultados conclui-se que:

- A escolha acertada de um esquema leva a melhores resultados em termos de durabilidade e custo ao longo do tempo;
- Dentro dos esquemas, o tipo de limpeza para remoção de produtos da corrosão no substrato pode ser um fator de peso no resultado ao longo do tempo. No caso particular, verificou-se que a limpeza do substrato através de jato abrasivo de grau Sa 2 ½ garante melhores resultados em termos de durabilidade do sistema de pintura;
- O custo do esquema de proteção aumenta consideravelmente com a melhor qualidade da limpeza do substrato. Neste caso foram analisados apenas 2 formas de 2 tipos de limpeza de substrato;
- As intervenções periódicas planeadas antes de a estrutura atingir patamares elevados de degradação permitem limpezas localizadas do substrato e tornam-se economicamente mais viáveis, garantindo uma aparência estética mais agradável em detrimento de largos períodos sem intervenção que podem danificar a estrutura de uma forma acentuada que obrigam a intervenções de grande escala que são inconvenientes para estruturas de elevada importância;

- Através das intervenções localizadas, há uma acumulação de revestimento protetor, sendo que espessura é sempre apontada como um fator preponderante nos revestimentos protetores. Nos resultados verificados, denotou-se que a limpeza do substrato provou-se ser mais importante que a espessura aplicada do revestimento.

6.2 - Desenvolvimentos futuros

Seria interessante, no futuro próximo, observando que a limpeza do substrato tem uma elevada importância na eficácia do sistema de proteção, o desenvolvimento de estudos sobre equipamentos de limpeza agora anunciados de grau St que supostamente equivalem a graus de limpeza médios de Sa. Este terá custos menores e não obrigam a todo o aparato de equipamento necessário para a execução de limpeza a jato abrasivo do substrato.

Seria igualmente interessante equiparar algumas das previsões efetuadas neste trabalho com outras efetuadas através da passagem de corrente elétrica na estrutura com medições constantes e estimativas de velocidade de corrosão e perda de massa de aço, admitindo que este método seja mais fidedigno em termos de resultados.

BIBLIOGRAFIA

1. Pinterest, Acedido em 8 maio 2018, <https://www.pinterest.pt/delessandro/gladiadores-roma-antiga/>
2. Moura, António (2016), Geologia económica dos metais básicos e dos metais ferrosos: Palimage.
3. Golden Gate Bridge, Acedido em 8 maio 2018 <http://goldengate.org/exhibits/portuguese/exhibitarea1e.php>.
4. Revista Sábado, Acedido em 8 de maio 2018 <https://www.sabado.pt/portugal/detalhe/ponte-25-de-abril-precisa-de-obras>.
5. Etermar, Engenharia e construção, Acedido em 7 maio 2018 https://issuu.com/etermar/docs/op_pten.
6. Zetacorr, Serviços e Tecnologias de prevenção à corrosão, Acedido em 7 maio 2018, <http://www.zetacorr.com/?p=677>.
7. Clark, F.W. (1924), The composition of the earth's crust: Washington: U.S. Gov. Print. Off.
8. Atkins & Jones (2012), Princípios de Química, questionando a vida moderna e o meio ambiente: Porto Alegre Bookman.
9. Tabela periódica - Acedido em 25 março 2017 <http://www.tabelaperiodicacompleta.com/metais-alcalino-terrosos>.
10. Mandal, S.K.(2015), Steel Metallurgy: Properties, Specifications and Applications: McGraw-Hill Education.
11. Fontana, Mars (1987), Corrosion Engineering Third edition: McGraw-Hill Education.
12. Jones, Denny A.(1996); Principles and Prevention of Corrosion: Prentice Hall.
13. School of Materials Science and Engineering Faculty of Science. Acedido em 28 março 2017 <http://www.materials.unsw.edu.au/tutorials/online-tutorials/2-formation-oxide-layer>.
14. Roberge, Pierre (2012); Handbook of Corrosion Engineering, Second Edition: McGraw-Hill Education.
15. Pereira, Elsa Vaz, LNEC (2006); Proteção de Estruturas Metálicas.
16. NP EN ISO 12944 (2007). Tintas e vernizes – Proteção anticorrosiva de estruturas de aço por sistemas de pintura.
17. Notas de apoio IST; Departamento de Engenharia Civil; Lisboa, 2013/14.
18. EN ISO 1504 (2007). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão.
19. Araújo, A.; Mesquita, T.J.; (2013) "Carbonated and chloride contaminated concrete structure: The role of molybdenum in corrosion of stainless steel reinforcement"; Revista Corrosão e Proteção de materiais (LNEG) Vol. 32 Nº 2, pp. 42-49.
20. Alves, Henrique; Lourenço, Zita; Colaço Pedro (2013); "Reabilitação de uma estrutura contaminada por iões de coreto utilizando a técnica de dessalinização"; Revista Corrosão e Proteção de materiais (LNEG) Vol. 32 Nº 1, pp. 3-9.
21. Figueiroa, R.; Pereira, E. (2014); "Corrosion of hot-dip galvanized steel reinforcement"; Revista Corrosão e Proteção de materiais (LNEG) Vol. 33 Nº 3, pp. 51-61.
22. Rodrigues Paula M., LNEC (2010); Proteção de Estruturas Metálicas – Aço. Revestimentos por pintura.
23. Diamantino, T.C.; Alves, I.N.; Gonçalves R.P.; Costa M.R (2014); "Esquemas de pintura para estruturas marítimas"; Revista Corrosão e Proteção de materiais (LNEG) Vol. 33 Nº3, pp. 44-50.
24. Dileta revestimentos metálicos, Acedido em 12 junho 2017 <http://www.dileta.com.br/fosfatizacao-zinco>.
25. ISO 1461 (2009). Revestimentos galvanização por imersão a quente em ferro e aço – Especificações e métodos de ensaio.
26. ISO 14713 (2009). Revestimentos zinco – Guias e recomendações para proteção anticorrosiva de estruturas de aço.
27. Sulzer spray systems, acedido em 22 julho 2017 - <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/systems/hvof/>.
28. ISO 1460 (1992). Revestimentos metálicos – Revestimentos galvanização por imersão a quente.

29. NP EN ISO 2808 (2007). Tintas e vernizes – Determinação de espessura de películas protetoras.
30. NP EN ISO 8501 (2007). Tintas e vernizes – Preparação de substratos de aço para a aplicação de proteção anticorrosiva por sistemas de pintura.
31. TEKNOS (2012);TEKNOS Handbook for corrosion protection: TECKNOS Oy.
32. NP EN ISO 4628 (2016). Tintas e vernizes – Avaliação de degradação de revestimentos por sistemas de pintura.
33. Secretaria Regional do Equipamento Social e Transportes, Direção Regional de Estradas, (2000); Memória Descritiva e Justificativa da Ponte de S. Vicente.
34. Retratosdeportugal, acedido em 29 julho 2017, <https://retratosdeportugal.blogspot.com/search/label/S%C3%A3o%20Vicente>.
35. NP EN ISO 2808 (2007). Tintas e vernizes – Determinação de espessura de películas protetoras.
36. NP ISO 2409 (2013). Tintas e vernizes – Ensaio da Quadricula.
37. ISO 1461 (2009). Revestimentos galvanização por imersão a quente em ferro e aço – Especificações e métodos de ensaio.
38. NP ISO 19840 (2012). Tintas e vernizes – Proteção anticorrosiva de estruturas de aço por sistemas de pintura. Medição e critérios de aceitação da espessura de películas secas sobre superfícies rugosas.
39. Diamantino, Teresa Cunha, LNEG (2015); Durabilidade de Materiais em Sines.
40. LNEC Departamento de Materiais. Acedido em 13 abril 2017 <http://www.lnec.pt/materiais/pt/nucleo/nucleo-de-materiais-metalicos/apresentacao-1/>.
41. infoescola – Eletricidade acedido em 3 maio 2017. <http://www.infoescola.com/eletricidade/diferenca-de-potencial/>.
42. Alves, Henrique; Lourenço, Zita; Colaço Pedro (2013); “Reabilitação de uma estrutura contaminada por iões de coreto utilizando a técnica de dessalinização”; Revista Corrosão e Proteção de materiais (LNEG) Vol. 32 Nº 1, pp. 3-9.
43. Mesquita, Carlos (2012); “Metodologias de inspeção e ensaios para avaliação do estado de conservação de estruturas de betão armado afetadas por corrosão de armaduras”; Revista Corrosão e Proteção de materiais (LNEG) Vol. 31 Nº 2, pp. 39-48.
44. Coelho, J.C.; Oliveira, C.M.; Fonseca, T.E. (2012); “A eficiência das técnicas eletroquímicas na remoção de iões de cloreto em amostras de uma bala de canhão de um naufrágio do Séc.XVIII” Revista Corrosão e Proteção de materiais (LNEG) Vol. 31 Nº 1, pp. 5 -11.

ANEXOS

Anexo 1

Recomendações de espessuras de revestimentos de zinco por imersão a quente (EN NP ISO 1461).

Quadro 3 – Valores mínimos de espessura e massa do revestimento em amostras não centrifugadas

Peça e sua espessura	Espessura local do revestimento (mínimo) ^{a)} μm	Massa local do revestimento (mínimo) ^{b)} g/m ²	Espessura média do revestimento (mínimo) ^{c)} μm	Massa média do revestimento (mínimo) ^{b)} g/m ²
Aço > 6 mm	70	505	85	610
Aço >3 mm a ≤ 6 mm	55	395	70	505
Aço ≥ 1,5 mm a ≤ 3 mm	45	325	55	395
Aço < 1,5 mm	35	250	45	325
Peças vazadas ≥ 6 mm	70	505	80	575
Peças vazadas < 6 mm	60	430	70	505

NOTA: Este Quadro é de uso geral: normas de produtos individuais poderão incluir requisitos diferentes, compreendendo diferentes categorias de espessuras. Os requisitos para as massas locais e média do revestimento são indicados neste Quadro para referência em caso de disputa.

^{a)} Ver 3.8.
^{b)} Massa equivalente de revestimento usando uma densidade nominal de revestimento de 7,2 g/cm³ (ver Anexo D).
^{c)} Ver 3.9.

Quadro 4 – Valores mínimos de espessura e massa do revestimento mínimo em amostras centrifugadas

Peça e sua espessura	Espessura local do revestimento (mínimo) ^{a)} μm	Massa local do revestimento (mínimo) ^{b)} g/m ²	Espessura média do revestimento (mínimo) ^{c)} μm	Massa média do revestimento (mínimo) ^{b)} g/m ²
Peças roscadas:				
> 6 mm de diâmetro	40	285	50	360
≤ 6 mm de diâmetro	20	145	25	180
Outras peças (incluindo peças vazadas):				
≥ 3 mm	45	325	55	395
< 3 mm	35	250	45	325

NOTA: Este Quadro é de uso geral: normas de revestimentos de elementos de fixação e normas de produtos individuais podem ter incluídos requisitos diferentes: ver também A.2.h). Os requisitos para as massas locais e média do revestimento são indicados neste Quadro para referência em caso de disputa.

^{a)} Ver 3.8.
^{b)} Massa equivalente de revestimento usando uma densidade nominal de revestimento de 7,2 g/cm³ (ver Anexo D).
^{c)} Ver 3.9.

Recomendações de espessuras mínimas para aspersão térmica (EN NP ISO 14616)

Categoria segundo EN ISO 12944-2	Metal (μm)							
	Zinco		Alumínio		AlMg5		ZnAl15	
	Não pintado	Pintado	Não pintado	Pintado	Não pintado	Pintado	Não pintado	Pintado
Im2	NR	100	200	150	250*	200*	NR	100
Im3	200	100	200	150	150	100	150	100
C2 e C3	100	50	150	100	150	100	100	50
C4 e C5-I	NR	100	200	100	200	100	150	100
C5-M	150	100	200	100	250*	200*	150	100
C1	50	50	100	100	100	100	50	50

NR - Não Recomendado
 * - Aplicação "Offshore"

Recomendações de espessuras em alguns sistemas de pintura para categoria de exposição C5-M (EN NP ISO 12944-5).

Quadro A.5 – Esquemas de pintura para aço-carbono de baixa liga em corrosividade de categoria C5-I e C5-M

Substrato: Aço-carbono de baixa liga										
Preparação de superfícies: Sa 2 ½, apenas os graus de enferrujamento A, B e C (ver ISO 8501-1)										
Nº Esquema de pintura	Demão(s) primária(s)				Demão(s) seguinte(s)	Esquema de pintura		Durabilidade Esperada		
	Ligante	Tipo de primário ^{a)}	Nº de demãos	ENPS ^{b)} µm		Tipo de Ligante	Nº de demãos	ENPS ^{b)} µm	Baixa	Média
C5-I										
A5L01	EP, PUR	Mist.	1-2	120	AY, CR, PVC ^{c)}	3-4	200			
A5L02	EP, PUR	Mist.	1	80	EP, PUR	3-4	320			
A5L03	EP, PUR	Mist.	1	150	EP, PUR	2	300			
A5L04	EP, PUR, ESI ^{d)}	Zn(R)	1	60 ^{d)}	EP, PUR	3-4	240			
A5L05	EP, PUR, ESI ^{d)}	Zn(R)	1	60 ^{d)}	EP, PUR	3-5	320			
A5L06	EP, PUR, ESI ^{d)}	Zn(R)	1	60 ^{d)}	AY, CR, PVC ^{c)}	4-5	320			
C5-M										
A5M01	EP, PUR	Mist.	1	150	EP, PUR	2	300			
A5M02	EP, PUR	Mist.	1	80	EP, PUR	3-4	320			
A.5M03	EP, PUR	Mist.	1	400	–	1	400			
A.5M04	EP, PUR	Mist.	1	250	EP, PUR	2	500			
A.5M05	EP, PUR, ESI ^{d)}	Zn(R)	1	60 ^{d)}	EP, PUR	4	240			
A.5M06	EP, PUR, ESI ^{d)}	Zn(R)	1	60 ^{d)}	EP, PUR	4-5	320			
A.5M07	EP, PUR, ESI ^{d)}	Zn(R)	1	60 ^{d)}	EPC	3-4	400			
A.5M08	EPC	Mist.	1		EPC	3	300			

Ligante do(s) Primário(s)	Tipo	Base aquosa possível	Ligante da(s) demão(s) seguinte(s)	Tipo	Base aquosa possível
EP = Epoxídico	2 componentes	X	EP = Epoxídico	2 componentes	X
EPC = Combinação epoxídica	2 componentes		EPC = Combinação epoxídica	2 componentes	
ESI = Silicato de etilo	1 ou 2 componentes	X	PUR = Poliuretano, alifático	1 ou 2 componentes	X
PUR = Poliuretano, aromático ou alifático	1 ou 2 componentes	X	CR = Borracha clorada	1 componente	
			AY = Acrílico	1 componente	X
			PVC = Cloreto de polivinilo	1 componente	

^{a)} Zn (R) = Primário rico em zinco, ver 5.2. Mist = mistura de vários pigmento anticorrosivos.

^{b)} ENPS = Espessura nominal da película seca. Ver 5.4 para mais detalhes.

^{c)} Recomenda-se a verificação da compatibilidade junto do fabricante da tinta.

^{d)} Recomenda-se que para primários ESI uma das subseqüentes demãos seja usada como demão de aderência e/ou selagem.

^{e)} É também possível usar uma ENPS de 40 µm a 80 µm se o primário rico em zinco escolhido for adequado para tal ENPS.

Anexo 2



NORMAS

Data de edição: Fevereiro 2011

NORMA EN ISO 8501

Protecção anticorrosiva de estruturas de aço por pintura

1. Introdução

O comportamento e durabilidade de qualquer revestimento de pintura são significativamente afectados pela preparação de superfície executada. No caso de estruturas de aço esta situação é ainda mais importante, uma vez que, desta forma, parece óbvio que a selecção do método de preparação de superfície assume uma importância muito relevante em qualquer tratamento anticorrosivo.

Dependendo do estado do suporte, do esquema de pintura que se pretende aplicar, da exposição e durabilidade pretendida para o revestimento, de limitações económicas e ambientais, ou outras, pode-se optar por diferentes tipos de preparação de superfície.

Seguidamente, apresentamos alguns dos métodos mais habituais para suportes de aço carbono com ou sem revestimento, aço galvanizado, alumínio e ligas leves, nomeadamente, decapagem com jacto abrasivo seco, limpeza com ferramentas mecânicas ou manuais, decapagem com jacto de água a muito alta pressão (hidrodecapagem), desengorduramento.

O comportamento prático dos revestimentos por pintura é significativamente afectado pelo estado da superfície de aço antes de ser pintado. Os principais factores conhecidos com influência neste aspecto são:

- Presença de ferrugem e de calamina
- Presença de contaminantes: sais, pó, óleos e gorduras
- Perfil da superfície

A norma ISO 8501 serve como método de avaliação visual da limpeza de superfícies e é de uso habitual para estabelecer esquemas de pintura. Esta norma divide-se em 4 partes.

- **EN ISO 8501-1:2007** - Graus de oxidação e de preparação de substratos de aço não pintados e de substratos de aço depois de totalmente decapados de revestimentos anteriores.
- **EN ISO 8501-2:2001** - Graus de preparação de substratos de aço previamente pintados, após a eliminação localizada de revestimentos anteriores.
- **EN ISO 8501-3:2007** - Classes de preparação de soldaduras, cantos e outras zonas com imperfeições de superfície.
- **EN ISO 8501-4:2006** - Condições iniciais da superfície, graus de preparação de superfície e graus de "flash rust" quando as preparadas por jacto de água a alta pressão ("high-pressure water jetting").

Neste documento faz-se referência apenas às partes 1 e 2.

Esta informação é apenas um resumo da norma. Para informação detalhada deverá adquirir a norma junto do IPC. As tabelas dos graus de oxidação e preparação de superfície não podem ser usadas como padrões fotográficos.

CIN-CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, SA
Avenida Dom Mendo, nº831 (antes E.N. 13) - Apartado 1008
4471-909 MAIA PORTUGAL
Telef. 22 940 50 00 - Fax: 22 948 56 61
www.cinprotective.com - email-customerservice.pt

BARNICES VALENTINE, S.A.U.
C/ Fiera Seca, 1 - Pol. Ind. Can Milans
08110 - Montcada i Reixac (Barcelona)
Tel. 34 93 565 66 00 - Fax: 34 93 575 33 60
www.cinprotective.com - email-valentina@valentina.es

CELLIOSE COATINGS
Chemin de la Verriere - BP 58,
69492 Pierre Bénite Cedex - France
Tel: +33 (0) 472 39 77 77 - Fax: +33 (0) 472 39 77 70
www.celliose.com

Data de edição: Fevereiro 2011

2. EN ISO 8501-1: Graus de oxidação e de preparação de substratos de aço não pintados e de substratos de aço depois de totalmente decapados de revestimentos anteriores

Esta parte da Norma ISO 8501 identifica 4 níveis (designados como "graus de oxidação"), que se encontram normalmente nas superfícies de aço não revestido e nas superfícies de aço armazenadas (Figura 1).



A

Superfície de aço revestido por calamina aderente e praticamente sem corrosão



B

Superfície de aço com oxidação residual e onde a calamina começa a desprender-se.



C

Superfície de aço cuja calamina desapareceu pela acção da oxidação ou que pode eliminar-se raspando, mas com leves picadas visíveis.



D

Superfície de aço cuja calamina desapareceu por acção da oxidação e em que se vê numerosas picadas.

Figura 1: Padrões fotográficos do grau de ferrugem.

A norma ISO 8501-1 identifica também certos graus de limpeza visual (designados como graus de preparação) após a preparação da superfície de aço não revestido e das superfícies de aço depois de eliminar totalmente qualquer revestimento anterior. São designados três graus de preparação de acordo com o método de limpeza utilizado: "Sa", "St" ou "Fl" (Figura 2).

Esta informação é apenas um resumo da norma. Para informação detalhada deverá adquirir a norma junto do IFC. As fotos dos graus de oxidação e preparação de superfície não podem ser usadas como padrões fotográficos.

CIN-CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, SA
Avenida Dom Mendo, nº831 (antes E.N. 13) - Apartado 1008
4471-909 MAIA PORTUGAL
Telef. 22 940 50 00 - Fax: 22 948 56 61
www.cinprotective.com - email: customerservice.pt

BARNICES VALENTINE, S.A.U.
C/ Riera Seca, 1 - Pol. Ind. Can Millars
08110 - Montcada i Reixac (Barcelona)
Tel. 34 93 565 66 00 - Fax: 34 93 575 33 60
www.cinprotective.com - email: valentine@valentine.es

CELLULOSE COATINGS
Chemin de la Verrière - BP 58,
69492 Piémont-Bénite Cedex - France
Tél: +33 (0) 472 39 77 77 - Fax: +33 (0) 472 39 77 70
www.celliosa.com

Data de edição: Fevereiro 2011

Limpeza por jacto abrasivo

- Sa 1 Limpeza por jacto abrasivo ligeiro
 Sa 2 Limpeza por jacto abrasivo intenso
 Sa 2 1/2 Limpeza por jacto abrasivo a fundo
 Sa 3 Limpeza por jacto até que o aço fique visivelmente limpo ("metal branco")

Limpeza manual e mecânica

- St 2 Limpeza manual e mecânica intensa
 St 3 Limpeza manual e mecânica a fundo

Limpeza por chama, FI

Praticamente não se utiliza.

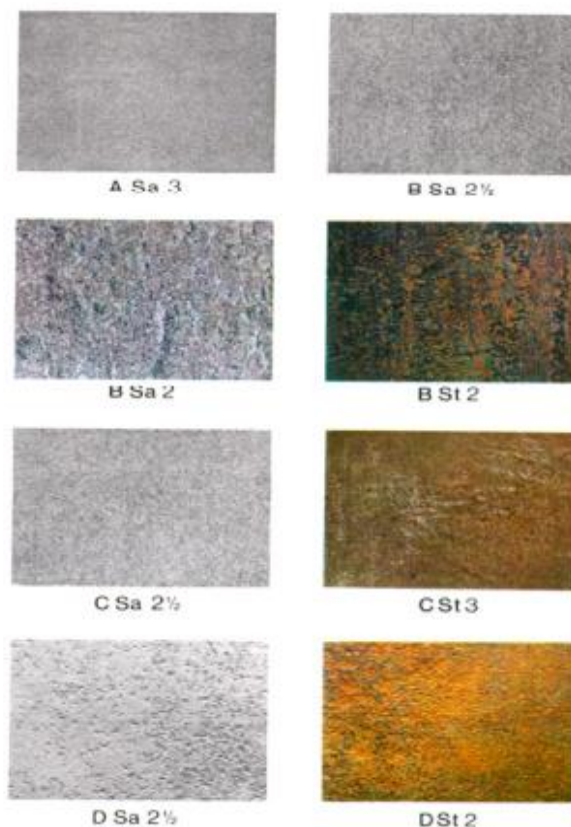


Figura 2: Padrões fotográficos dos graus de preparação de superfície.

Esta informação é apenas um resumo da norma. Para informação detalhada deverá adquirir a norma junto do IPC. As fotos dos graus de oxidação e preparação de superfície não podem ser usadas como padrões fotográficos.

CIN-CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, SA
 Avenida Dom Afonso, nº831 (antes E.N. 13) - Apartado 1008
 4471-909 MAIA PORTUGAL
 Telef: 22 940 50 00 - Fax: 22 948 56 61
 www.cinprotective.com - email: customerservice.pt

BARNICES VALENTINE, S.A.U.
 Cf Riera Seca, 1 - Pol. Ind. Can Milans
 08110 - Móra de la Nova (Barcelona)
 Tel: 34 93 525 68 00 - Fax: 34 93 575 33 60
 www.cinprotective.com - email: valentini@valentine.es

CELLULOSE COATINGS
 Chemin de la Verrière - BP 56,
 69492 Pierre Bénite Cedex - France
 Tél: +33 (0) 472 39 77 77 - Fax: +33 (0) 472 39 77 70
 www.cellose.com

Data de edição: Fevereiro 2011

3. EN ISO 8501-2. Graus de preparação de substratos de aço previamente pintados, após a eliminação localizada de revestimentos anteriores

Esta parte da norma baseia-se na experiência de que nem sempre é necessária a eliminação total dos revestimentos anteriores. Isto é especialmente verdade quando o trabalho de manutenção é efectuado em intervalos regulares de tempo. Cada grau de preparação designa-se pelas letras correspondentes "Sa", "St" ou "Ma", que indicam o tipo de método de limpeza utilizado. A letra P situada em frente indica eliminação localizada.

Jacto abrasivo localizado, P Sa

- P Sa 2 Limpeza por jacto abrasivo localizado intenso
- P Sa 2 1/2 Limpeza por jacto abrasivo localizado a fundo
- P Sa 3 Limpeza por jacto abrasivo localizado até que o aço fique visivelmente limpo

Limpeza localizada manual e mecânica, P St

- P St 2 Limpeza localizada manual e mecânica intensa
- P St 3 Limpeza localizada manual e com ferramentas motorizadas a fundo

Limpeza por abrasão mecânica localizada, P Ma

- P Ma Abrasão mecânica localizada

À semelhança dos casos anteriores, são também utilizados padrões fotográficos como referência.

A CIN Protective Coatings recomenda uma leitura atenta e integral da norma.
Para adquirir as normas deverão contactar o autor das mesmas.

IPQ – Instituto Português da Qualidade
R. António Gilão, 2
2829-513 Caparica
Telefone +351 212 948 237
Fax +351 212 948 112
ipq@mail.ipq.pt

Esta informação é apenas um resumo da norma. Para informação detalhada deverá adquirir a norma junto do IFC. As fotos dos graus de oxidação e preparação de superfície não podem usadas como padrões fotográficos.

CIN-CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, SA
Avenida Dom Nuno, nº831 (antes E.N. 13) - Apartado 1008
4471-909 MAIA PORTUGAL
Telef. 22 940 50 00 - Fax: 22 948 56 61
www.cinprotective.com - email-customerservice.pt

BARNICES VALENTINE, S.A.U.
C/ Riera Seca, 1 - Pol. Ind. Can Mllars
08110 - Montcada i Reixac (Barcelona)
Tel. 34 93 565 66 00 - Fax: 34 93 575 33 60
www.cinprotective.com - email-valentine@valentine.es

CELLULOSE COATINGS
Chemin de la Vallée - BP 58,
89492 Pierre Bénite Cedex - France
Tél: +33 (0) 472 39 77 77 - Fax: +33 (0) 472 39 77 70
www.celose.com

Anexo 3



NORMAS

Data de edição: Fevereiro 2011

Norma NP EN ISO 4628 Avaliação da degradação de revestimentos

1. Introdução

Todos os revestimentos sofrem uma degradação ao longo do tempo, qualquer que seja o tipo de exposição a que está sujeito. As anomalias que surgem podem ser as mais variadas, como por exemplo, empolamento, fissuração, pulverulência, descamação do revestimento ou enferrujamento do aço pintado.

A avaliação do tipo e dimensão destes defeitos deve ser feita de forma o mais universal possível, para que qualquer entidade envolvida comunique convenientemente com todas as outras interessadas. A Norma ISO 4628 "Tintas e vernizes. Avaliação da degradação de revestimentos. Designação da quantidade e dimensão dos defeitos e da intensidade das alterações uniformes de aspecto" foi criada com esse propósito, permitindo avaliar e quantificar os principais defeitos dos revestimentos.

A utilização desta norma deve ser a base para a definição das garantias e expectativas de durabilidade dos esquemas de pintura, sendo referenciada noutras, como por exemplo na NP EN ISO 12944.

2. Resumo da norma

A norma NP EN ISO 4628 divide-se em 9 partes, cada uma delas com diferentes defeitos que podem surgir nos revestimentos por pintura:

NP EN ISO 4628-1:2005	Parte 1: Introdução geral e sistema de designação dos defeitos
NP EN ISO 4628-2:2005	Parte 2: Avaliação do grau de empolamento
NP EN ISO 4628-3:2005	Parte 3: Avaliação do grau de enferrujamento
NP EN ISO 4628-4:2005	Parte 4: Avaliação do grau de fissuração
NP EN ISO 4628-5:2005	Parte 5: Avaliação do grau de descamação
EN ISO 4628-6:2007	Parte 6: Avaliação do grau de pulverulência pelo método da fita adesiva (inglês)
NP EN ISO 4628-7:2005	Parte 7: Avaliação do grau de pulverulência pelo método do tecido veludo
NP EN ISO 4628-8:2007	Parte 8: Avaliação do grau de delaminação e corrosão em volta de um corte
NP EN ISO 4628-10:2005	Parte 10: Avaliação do grau de corrosão filiforme

Todas as partes da norma original têm transcrição para Norma Portuguesa, com excepção da parte 6, pelo que é adoptada a EN ISO 4628-6:2007.

A parte 1 da norma estabelece um sistema geral para designação da quantidade, da intensidade e dimensão dos defeitos e das alterações no aspecto dos revestimentos, para além de resumir os princípios a serem usados na interpretação da totalidade da Norma NP EN ISO 4628. As outras partes da norma proporcionam também padrões fotográficos de referência ou outros esquemas para avaliar os tipos concretos de defeitos.

Do ponto de vista da protecção anticorrosiva, os defeitos mais significativos são o empolamento e o grau de oxidação/enferrujamento, que podem ser avaliados de acordo com a parte 2 e 3 da norma.

Seguidamente faremos uma abordagem resumida destas três partes.

Esta informação é apenas um resumo da norma. Para informação detalhada deverá adquirir a norma junto do IPC. As fotos dos graus de corrosão e de empolamento não podem usadas como padrões fotográficos.

CIN-CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, SA
Avenida Dom Mendo, nº831 (antes E.N. 13) • Apartado 1008
4471-909 MAIA PORTUGAL
Telef. 22 940 50 00 • Fax: 22 948 56 61
www.cinprotective.com • email:customerservice.pt

BARNICES VALENTINE, S.A.U.
C/ Riera Seca, 1 – Pol. Ind. Can Milans
08110 – Montcada i Reixac (Barcelona)
Tel. 34 93 565 66 00 • Fax: 34 93 575 33 60
www.cinprotective.com • email:valentine@valentine.es

CELLULOSE COATINGS
Chemin de la Verrière • BP 58,
69492 Pierre Bénite Cedex - France
Tél: +33 (0) 472 39 77 77 • Fax: +33 (0) 472 39 77 70
www.cellulose.com

Data de edição: Fevereiro 2011

2.1 NP EN ISO 4628-1 Introdução geral e sistema de designação

Nesta parte da norma são indicados os critérios para avaliar a intensidade ou quantidade dos defeitos e a dimensão dos defeitos associados aos revestimentos por pintura definidos nas partes seguintes.

Foi adoptado um critério uniforme para a designação da intensidade e dimensão dos defeitos, numa escala numérica de 0 a 5, em que o 0 significa ausência de alterações e o 5 defeitos de tal forma graves que uma alteração adicional já não tem qualquer significado prático. Os valores intermédios são definidos de maneira a permitirem uma diferenciação óptima dentro da classificação completa.

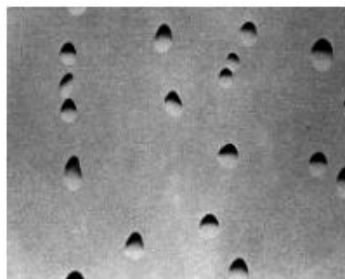
No caso de ser exigida ou ser relevante a avaliação da dimensão dos defeitos os valores limites são os mesmos, correspondendo o 0 a defeitos não visíveis com ampliação de 10 vezes e o 5 a defeitos com dimensão superior a 5mm. Neste caso, os valores são precedidos da letra "S".

A título de exemplo, no caso de uma superfície que apresente empolamentos, em pouca quantidade (poucos defeitos, mas já com significado) e visíveis a olho nu, deverá ser avaliado da seguinte forma: Grau de empolamento 2 (S2)

2.2 NP EN ISO 4628-2 Avaliação do grau de empolamento

A avaliação do grau de empolamento faz-se indicando a densidade das bolhas e o seu tamanho.

Avaliação do empolamento - "Blistering" :



<u>Densidade</u>		<u>Tamanho</u>
<u>ISO</u>	<u>ASTM</u>	<u>ISO</u>
0	Nenhuma	
1	Escassa	1 x 10 aumentos
2	Pouca	visíveis
3	Media	até 0,5mm
4	Media-Alta	4 0,5-5mm
5	Alta	> 5 mm

Considerações para a manutenção:

- Na prática a área a reparar será a realmente afectada multiplicada por 10.
- Se o empolamento afecta uma área inferior a 2,5% poderá realizar-se apenas uma reparação local. Acima de 2,5% recomenda-se a reparação total da zona (reposição completa do esquema de pintura)

Esta informação é apenas um resumo da norma. Para informação detalhada deverá adquirir a norma junto do IPI. As fotos dos graus de corrosão e de empolamento não podem ser usadas como padrões fotográficos.

CIN-CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, SA
Avenida Dom Miranda, nº83 (ant. E.N. 13) - Apartado 1008
4471-909 MAIA PORTUGAL
Telef. 22 940 50 00 - Fax: 22 948 56 61
www.cinprotective.com - email:customerservice.pt

BARNICES VALENTINE, S.A.U.
C/ Riera Seca, 1 - Pol. Ind. Can Milans
08110 - Montcada i Reixac (Barcelona)
Tel. 34 93 565 66 00 - Fax: 34 93 575 33 60
www.cinprotective.com - email:valentine@valentine.es

CELLULOSE COATINGS
Chemin de la Verrière - BP 58,
95492 Pierre Bénite Cedex - France
Tél: +33 (0) 472 39 77 77 - Fax: +33 (0) 472 39 77 70
www.cellulose.com

Data de edição: Fevereiro 2011

2.3 NP EN ISO 4628-3 Avaliação do grau de enferrujamento

Esta parte apresenta um conjunto de padrões fotográficos, que devem ser utilizados para comparação com as superfícies pintadas, de forma a ser quantificado o grau de enferrujamento/corrosão. São também apresentadas tabelas com a percentagem de área com oxidação visível das superfícies. Os graus de corrosão são designados por "Ri". Na tabela abaixo estão indicadas as áreas para cada nível de corrosão.

Avaliação do grau de oxidação - "Rusting"

ISO	Escala Europeia	ASTM	% área oxidada
Ri0	Re0	10	0
Ri1	Re1	9	0,05
Ri2	Re2	7	0,5
Ri3	Re3	6	1
Ri4	Re5	4	8
Ri5	Re6	1 a 2	40/50

A Norma EN ISO 12944-5 determina que o Grau Ri3 corresponde fim da durabilidade do sistema de pintura, visto que já há necessidade de realizar a primeira pintura de manutenção.

Em conjunto com o grau de enferrujamento/corrosão, também se pode avaliar a dimensão das manchas de oxidação, de acordo com a parte 1 da norma.

A título de exemplo, no caso de uma superfície pintada que apresente oxidação semelhante ao padrão fotográfico correspondente ao Ri 3 (cerca de 1% de área corroída) e tenha manchas com uma dimensão claramente visível a olho nu (até 0.5mm), deverá ser classificada como um "Ri 3 (S3)".

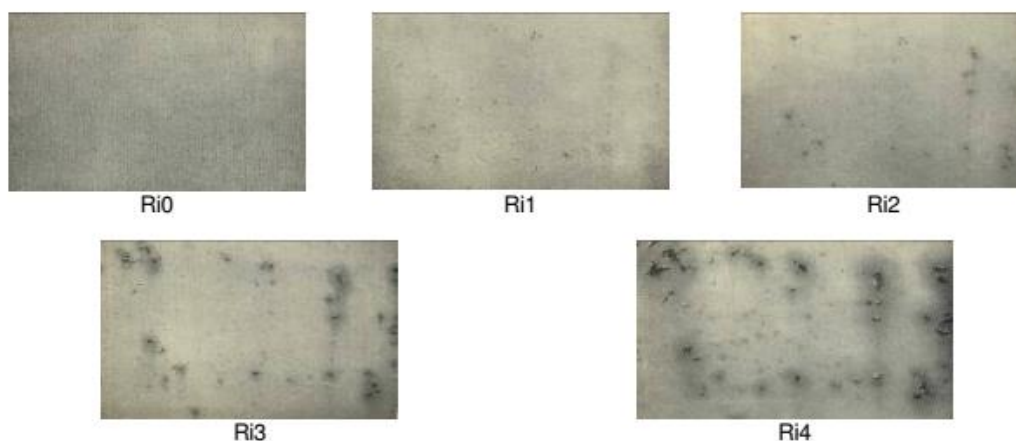


Figura 3: Padrões fotográficos correspondentes à norma ISO 4628-3, para avaliar o grau de oxidação de uma superfície pintada.

Esta informação é apenas um resumo da norma. Para informação detalhada deverá adquirir a norma junto do IPC. As fotos dos graus de corrosão e de empolamento não podem ser usadas como padrões fotográficos.

CIN-CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, SA
Avenida Dom Mendo, nº831 (antes E.N. 13) - Apartado 1008
4471-909 MAIA PORTUGAL
Telef. 22 940 50 00 - Fax: 22 948 56 61
www.cinprotective.com - email-customerservice.pt

BARNICES VALENTINE, S.A.U.
C/ Riera Seca, 1 - Pol. Ind. Can Milans
08110 - Montcada i Reixac (Barcelona)
Tel. 34 93 565 66 00 - Fax: 34 93 575 33 60
www.cinprotective.com - email-valentine@valentine.es

CELLULOSE COATINGS
Chemin de la Verrière - BP 58,
69492 Pierre Bénite Cedex - France
Tél: +33 (0) 472 39 77 77 - Fax: +33 (0) 472 39 77 70
www.cellulose.com

CIN

NORMAS

Data de edição: Fevereiro 2011

Considerações para a manutenção:

- A zona a reparar será a realmente afectada pela oxidação multiplicada por 10 se for dispersa e multiplicada por 2 se for localizada.
- Se a corrosão apresenta um grau Ri 4 ou inferior pode-se efectuar apenas uma reparação local. Acima de Ri4 recomenda-se uma reparação total da zona.

A CIN Protective Coatings recomenda uma leitura atenta e integral da norma.
Para adquirir as normas deverão contactar o autos das mesmas:

IPQ – Instituto Português da Qualidade
R. António Gião, 2
2829-513 Caparica
Telefone +351 212 948 237
Fax +351 212 948 112
ipq@mail.ipq.pt

Esta informação é apenas um resumo da norma. Para informação detalhada deverá adquirir a norma junto do IPQ. As fotos dos graus de corrosão e de empolamento não podem usadas como padrões fotográficos.

CIN-CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, SA
Avenida Dom Mendo, nº831(antigo E.N. 13) • Apartado 1008
4471-909 MAIA PORTUGAL
Telef. 22 940 50 00 • Fax: 22 948 56 61
www.cinprotective.com • email-customerservice.pt

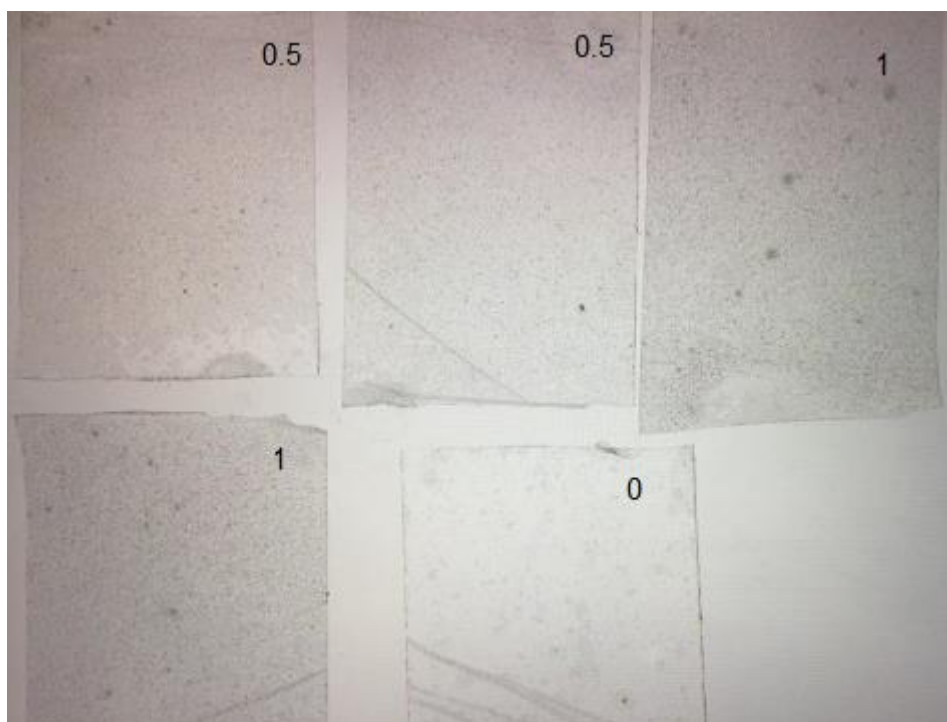
BARNICES VALENTINE, S.A.U.
C/ Riera Seca, 1 – Pol. Ind. Can Milans
08110 – Montcada i Reixac (Barcelona)
Tel. 34 93 565 66 00 • Fax: 34 93 575 33 60
www.cinprotective.com • email-valentine@valentine.es

CELLULOSE COATINGS
Chemin de la Verrière • BP 58,
69492 Pierre Bénite Cedex - France
Tél: +33 (0) 472 39 77 77 • Fax: +33 (0) 472 39 77 70
www.cellulose.com

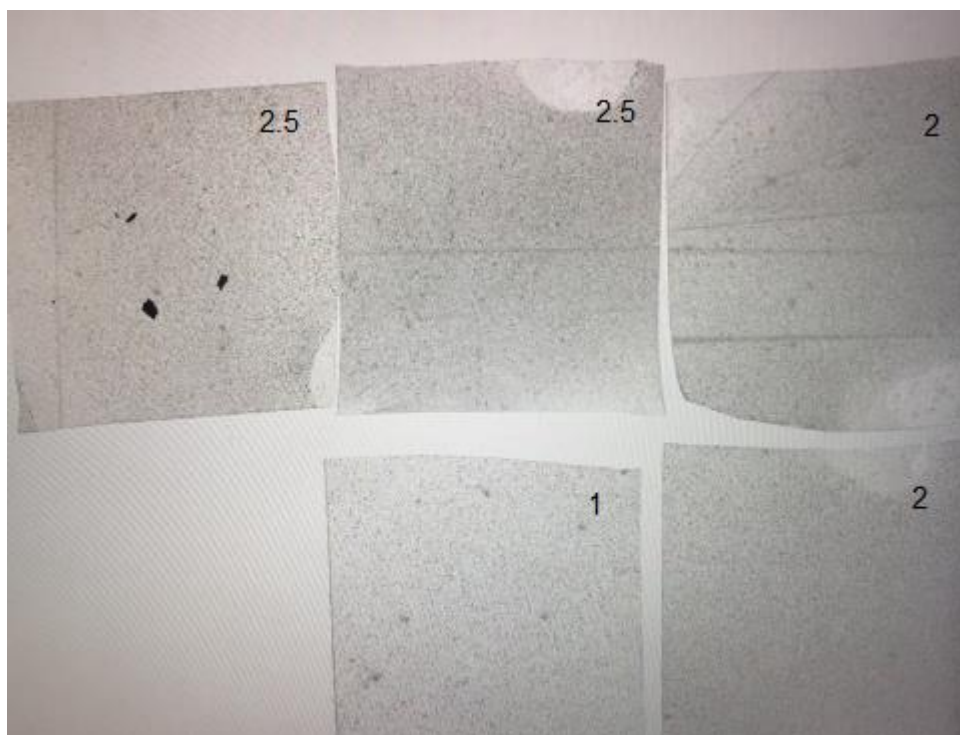
Anexo 4

Relatório de Ensaio:

- a) Este relatório deve-se aos ensaios realizados à estrutura da ponte S. Vicente, Madeira em Dezembro 2017.
- b) Os ensaios foram de acordo com a norma ISO 4628-6 relativo ao grau de pulverulência através do método da fita adesiva.
- c) Detalhes do método:
 - Tipo de Degradação - Degradação natural;
 - Tipo de Fita adesiva utilizada - Fita adesiva transparente tipo TESA, 50*60mm²;
 - Tipo de fundo para comparação - O fundo de comparação utilizado deveu-se a um aparelho de iluminação plano de fundo branco.
- d) Foram realizados 7 ensaios em torno do tubo principal para as 2 áreas de diferentes intervenções (2 e 7 anos) e apenas utilizados os 5 piores resultados.
 - Dos ensaios na zona mais recente (2 anos), segue-se os resultados:
Média dos ensaios: 0.6



- Dos ensaios na zona mais antiga (7 anos), segue-se os resultados:
Média dos ensaios: 2



- e) Alguns desvios podem ser verificados pelo manuseamento da fita e alguma sujidade existente na própria estrutura.
- f) Não foram verificadas anomalias durante a aplicação do ensaio.
- g) O ensaio foi efetuado pelo Utilizador em Dezembro 2017.
- h) Base comparação em fundo branco presente na norma:
 - EN NP ISO 12944-6 segundo o padrão fotográfico da figura seguinte:

