

CORROSÃO DO AÇO EM MEIOS INDUSTRIAIS: UMA REVISÃO TEÓRICA

MALINOWSKI, Sandro Antonio

BOARÃO, Jair Henrique

RESUMO

A preocupação da indústria com a proteção anticorrosiva é justificável devido ao fato deste fenômeno consumir em média 3% do PIB global. No artigo são apresentadas características do aço que o tornam uma matéria-prima de uso geral por conta de uma gama de características, dentre as principais estão a ductibilidade e a resistência mecânica. Entretanto este material sofre processo de corrosão a partir da exposição aos agentes ambientais como água, oxigênio e agentes químicos. Os tipos de corrosão que degradam o aço são os processos químico e eletroquímico, cada um destes envolve um leque de situações particulares. O conhecimento destes processos de corrosão propicia aos engenheiros de materiais ferramentas para indicar os melhores métodos de proteção. Uma ferramenta importante nesta seara é a Norma ISO12944 que classifica os tipos de ambientes de acordo com a agressividade. Esta mesma norma organiza como são os ambientes de trabalho tanto para ambientes ao ar livre, quanto para ambientes abaixo do solo ou imersos em águas doce ou salgada.

Palavras chave: Aço carbono. Corrosão. Proteção.

1 INTRODUÇÃO

Uma preocupação constante da indústria mundial do aço é a proteção contra a corrosão. Dados de entidades mundiais apontam ser de ordem considerável no PIB (Produto Interno Bruto) mundial os gastos com a corrosão do aço. No Brasil, indicadores apontam ser da ordem de 30% do volume de aço fabricado sendo destinado à reposição sistemática das perdas pela corrosão” (SILVA e MELQUIADES, 2008, p.11).

A partir desta informação é que desenvolveu o objetivo geral deste artigo que é apresentar os principais tipos de corrosão em ambientes imersivos.

Assim, elaboraram-se os objetivos específicos que são: a) caracterizar o processo de corrosão do aço carbono; b) diferenciar os tipos de corrosão; c)

Apresentar os tipos de ambientes corrosivos para trabalhos em imersão segundo a Norma ISO12944:2017.

Estabelecidos os objetivos geral e específicos para a elaboração do estudo, seguem suas justificativas.

Do ponto de vista acadêmico, o artigo visa contribuir com engenheiros interessados em compreender os processos de corrosão e proteção do aço carbono na indústria. Trata-se de uma revisão de literatura acerca do tema para interessados em compreender os mecanismos de corrosão para tomada de ações de proteção.

Sob a ótica social, este trabalho representa uma contribuição na forma de preservação dos recursos naturais, pois conhecendo os mecanismos de corrosão é possível a adoção de técnicas de prevenção em caso de fabricação de novas peças de reposição, preservando-se, assim, o meio ambiente sob as óticas: primeiro pela redução de extração de minério de ferro, segundo pela redução do transporte de sucatas e material em processo de degradação para as siderurgia e por último pelo fator econômico associado aos processos de substituição de partes atacadas por processos corrosivos.

Em esfera pessoal, destaca-se o envolvimento do autor da pesquisa com o setor de proteção anticorrosiva industrial, tendo atuado como profissional técnico e inspetor de pintura industrial qualificado de acordo com as Normas SNQC (Sistema Nacional de Qualificação e Certificação em Corrosão). Durante o tempo de atuação como profissional, teve a oportunidade de presenciar trabalhos de recuperação e ou substituição do aço, que sofreu processo de corrosão em indústrias químicas, petroquímicas, papel e celulose, usinas hidrelétricas dentre outros segmentos de mercado. Assim, a contribuição pessoal deste material, por meio de revisão de literatura, visa a contribuir com as áreas da engenharia envolvidas em processos de manutenção.

REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura em curso descreve o processo da corrosão, iniciando-se pela natureza dos processos corrosivos. Em seguida é apresentada a classificação dos ambientes corrosivos, conforme normativa internacional.

Foi utilizada como ferramenta de apoio para classificar os ambientes corrosivos a Norma ISO 12944 que teve sua publicação em 1998 e atualmente a

revisão em uso é a 2017, que é utilizada para qualificar estes ambientes e indicar revestimentos poliméricos com as tecnologias de tinta a serem aplicadas para a melhor durabilidade do aço ao longo do tempo. Esta Norma é válida somente para aplicação de tintas industriais como meio de proteção anticorrosiva.

Após as primeiras explanações sobre o tema do artigo apresentam-se referenciais sobre a corrosão.

A exploração do solo e a descoberta do minério de ferro pelos antepassados, criaram um produto novo, o aço, resultado do processamento em fornos siderúrgicos do minério de ferro extraído da natureza.

De acordo com Chiaverini (1998), a importância do aço na indústria mundial da construção provém de fatores como:

- a) ductibilidade: representa o grau que um material pode sofrer processos de conformação até a ruptura de sua estrutura cristalina;
- b) boa resistência mecânica;
- c) possibilidade de ser forjado, soldado, usinado;
- d) possibilidade de passar por processo de calandragem, estamparia e modificação em suas propriedades por meio de tratamentos térmicos, químicos e mecânicos.

Segundo Nunes e Lobo (2007), o aço vem sendo utilizado como principal material de construção industrial há muito tempo. Mesmo sabendo-se ser um artigo que sofre corrosão, está presente em larga escala em pontes, coberturas de indústrias e outras aplicações graças ao seu custo relativamente barato e por fatores de reciclagem.

Para Figueiredo (2003), a produção do aço é forte indicador de desenvolvimento de um país, visto que ser item utilizado no cotidiano das pessoas, desde eletrodomésticos a carros e imóveis.

A produção do aço requer matérias primas que são encontradas na natureza: minério de ferro, carvão, cal e sucata de ferro, aquecidas em um forno à temperatura de aproximadamente 1400°C. O processo é composto de: preparação de matérias primas, redução (processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono, ocorre dentro de um equipamento chamado alto forno), refino e laminação. Após estes processos, é distribuído para as mais variadas finalidades e, dependendo do ambiente em que é utilizado, sofre maior ou menor ataque dos agentes corrosivos.

A corrosão tornou-se uma área de estudo tão importante que a partir dos anos 1980 existe uma ciência chamada de Engenharia da Corrosão, segundo

Munger (1984), que tem por objetivo estudar mecanismos para prolongar a vida útil do aço.

De acordo com Gentil (2003)

é de pleno conhecimento que materiais metálicos são suscetíveis ao fenômeno da corrosão pelo fato desta ser um processo absolutamente natural e espontâneo. O processo corrosivo, ou oxidação, é considerado uma reação química heterogênea ou pode ser fruto de uma reação eletroquímica que ocorre na interface de contato entre o metal e o meio corrosivo.

Para Gentil (1982) a oxidação pode ser entendida como a perda de elétrons por uma espécie química conforme representado na figura 1:



Figura 1: processo de perda de elétrons,

Fonte: Adaptado de Gentil (1982)

Os processos de corrosão eletroquímica são os mais frequentes na natureza sendo caracterizados basicamente por realizarem-se em contato com água líquida, terem temperatura abaixo do ponto de orvalho e formarem pilhas de corrosão, estas contém obrigatoriamente quatro elementos: (a) anodo: região de ocorrência da reação de oxidação; (b) cátodo: região de ocorrência da reação de redução que protege a região, não há incidência de corrosão nesta área; (c) eletrólito: solução condutora que envolve o cátodo e (d) o ânodo e a ligação elétrica entre cátodo e ânodo. (NUNES E LOBO.2007).

Para Gentil (2003) a corrosão pode apresentar-se sob diferentes formas. Os tipos de corrosão podem ser classificados de acordo com a forma de ataque, as causas e seus mecanismos. Desta forma pode-se caracterizar um processo corrosivo conforme:

a) sua morfologia: corrosão alveolar, uniforme, por placas, por esfoliação, localizada em cordões de solda ou pelo empolamento do hidrogênio.

b) suas causas: gerada por aeração diferencial, mecanismo eletrolítico, tensão mecânica ou fragilização pelo hidrogênio.

c) Os fatores mecânicos: gerados por tensão, fadiga, atrito e fatores associados à erosão.

d) O meio corrosivo: atmosferas, solos, águas doces ou salgadas.

A caracterização da forma de corrosão auxilia no entendimento sobre qual a metodologia de proteção mais adequada.

Atualmente, o aço é amplamente utilizado na construção industrial sendo aplicado pela engenharia à construção de pontes, navios, edifícios, máquinas, equipamentos e usinas geradoras de energia elétrica como usinas termoelétricas, nucleares, hidrelétricas, eólicas e fontes geradoras a partir de biomassa.

A corrosão dos metais ocorre porque o aço entra em contato com o oxigênio, com meios aquosos ou pelo contato com agentes químicos. (NUNES e LOBO, 2007).

A corrosão, portanto, é um processo espontâneo e, ao mesmo tempo de destruição do metal, como mostrado em viga de ponte metálica em ferrovia na figura 2. O tema se tornou de relevada importância pelo fato do aço ser amplamente utilizado na construção e objeto de estudos científicos e tecnológicos com a finalidade de prolongar a vida destes objetos metálicos.

E ainda, Gentil (1982) ressalta que o processo de corrosão pode ser entendido como o inverso do processo de metalurgia, que transforma minérios em aço, enquanto o outro tende a transformar o metal em minério semelhante ao extraído anteriormente, conforme pode ser observado na Figura 2.



Figura 1: Corrosão em viga de aço carbono em ponte.
Fonte: O autor (2013).

O custo da corrosão é da ordem de 3,5% do Produto Interno Bruto (PIB) no Brasil, e de acordo com Bardal (2004), o custo da corrosão em países industrializados é da ordem de 3% a 4% do PIB. Destes valores, aproximadamente 20% desta corrosão é considerada como sendo um processo que poderia ser evitado mediante o uso de técnicas de proteção contra a corrosão. (NUNES, 2007).

Ainda, no Brasil, estudos das empresas produtoras de aço “estimam ser da ordem de 30% do volume da produção nacional, os materiais destinados à reposição de estruturas danificadas pela corrosão tanto em ambientes de alta ou baixa agressividade” (SILVA e MELQUIADES, 2008, p.11).

De acordo com a publicação eletrônica da revista *Macaé Offshore*, em sua edição 18, os custos anuais com a corrosão no país chegam a US\$ 10 Bilhões (dez bilhões de dólares), algo entre 1% a 3% por cento do PIB nacional.

A importância do uso do aço se deve a vários fatores como resistência mecânica, flexibilidade, relativa homogeneidade, processo de calandragem e demais processos de manufatura industrial. Para a utilização na construção foram elaborados os chamados aços estruturais que possuem melhores propriedades de resistência.

Segundo Cândido (2002) dentre estes se tem:

- a) Aços tipo carbono que tem média resistência mecânica para aplicações em estruturas leves;
- b) Aços de baixa liga que possuem elevada resistência à corrosão atmosférica;
- c) Aços resistentes ao fogo que tem propriedades de resistência mecânica e à corrosão atmosférica.

No caso da corrosão em superfícies pintadas Alvarenga (2003) reforça que produtos da corrosão têm grande influência na continuidade do processo corrosivo, pois à medida que se formam também aumentam de volume exercendo ação mecânica sobre a camada metálica, desprendendo-a do substrato metálico, criando dessa forma, novas frentes de corrosão.

Por outro lado, de acordo com Newman & Sieradzki, 1994 os aços estruturais sofrem corrosão química e eletroquímica, sendo:

a) a corrosão química aquela caracterizada pela ausência de água, em temperaturas elevadas e no contato direto do metal com o meio corrosivo, sendo denominada ainda como corrosão seca devido ao fato de ocorrer em meio não aquoso. Ocorre geralmente em caldeiras e fornos por conta das particularidades: ausência de água líquida; temperatura elevada (acima de 400°C), sempre acima do ponto de orvalho, ocorre entre o metal e o meio.

b) Na corrosão eletroquímica há presença de água líquida, em temperatura ambiente formando as chamadas pilhas de corrosão. Os principais meios corrosivos são a atmosfera, os solos, água doce e água salgada.

Evans (1960) relaciona a corrosão atmosférica a três fatores, são eles:

a) Corrosão atmosférica seca, aquela que ocorre em umidade relativa menor que a umidade relativa crítica, seu mecanismo de corrosão é semelhante ao da oxidação;

b) Corrosão atmosférica úmida, aquela que ocorre em umidade relativa igual ou maior que a umidade relativa crítica, forma um filme fino e invisível sobre a superfície metálica gerando reações por mecanismos eletroquímicos;

c) Corrosão úmida saturada que ocorre mediante a ocorrência de chuva. Há formação de um filme de eletrólito que é perceptível visivelmente sobre o metal, neste caso a corrosão é a eletroquímica.

Segundo Nunes (2007), as atmosferas que favorecem o processo de corrosão são classificadas em:

a) atmosfera marinha: do nível do mar até a orla marítima (cerca de 500 metros da praia), com predominância de ventos na direção da superfície metálica pintada ou não,

b) atmosfera próxima à orla marinha: são aquelas localizadas além dos 500 metros da praia e se estendem até onde os sais possam alcançar;

c) atmosfera industrial: envolvem regiões com muitos gases provenientes de combustão, particularmente gases oriundos de combustíveis com alto teor de enxofre e outros processos industriais;

d) Atmosfera úmida: são aquelas áreas em que a umidade relativa média está acima de 60%, tendo predominância de valores superiores a 75%;

e) Atmosfera urbana e semi-industrial: típica das cidades onde se tem uma razoável quantidade de gases provenientes de veículos automotores e uma indústria razoavelmente desenvolvida;

f) Atmosfera rural e seca: locais, normalmente no interior, onde não existem gases industriais ou sais em suspensão e a umidade relativa do ar se apresenta com valores sempre baixos.

Citados os principais meios corrosivos atmosféricos de acordo com a literatura apresenta-se o contexto específico da proteção do aço em ambientes permanentemente imersos em água doce e sujeitos à abrasão.

De acordo com Chiaverini (1998) a água doce inclui águas poluídas ou não poluídas, de reservatórios, rios, lagos, represas e poços. Nesse meio o fator de aceleração do processo corrosivo são os gases dissolvidos na água, dentre eles o oxigênio.

O oxigênio não age sozinho neste caso, contribui para a aceleração do processo de geração de dióxido de carbono e outros gases dissolvidos na água em que se encontra uma estrutura imersa. Para o autor ainda, o efeito do poder

de concentração do hidrogênio (pH) em águas doces naturais fica entre 4,5 e 9,5 tendo mínimo impacto no processo de corrosão. Para Panossian (1993) o pH das águas naturais varia entre 4,5 e 8,5, sendo que as águas com pH superior a 8,5 são pouco agressivas ao aço devido ao fator de passivação destas águas.

Panossian (1993) complementa a informação sobre os compostos químicos encontrados nas águas incluindo nestes o dióxido de carbono, amônia, gases sulfurosos, sais de ácidos, magnésio, sulfatos, nitratos, bicarbonatos, sílica, matéria orgânica e resíduos como óleos e detergentes produzidos pelo homem. Outrossim, há de se considerar o índice de saturação por sais de cálcio e magnésio. Quando a concentração destes sais é alta, pode-se dizer que a água é dura, quando a concentração destes sais é baixa, diz-se que a água é mole.

As concentrações destes sais são avaliadas quanto ao teor de carbonato de cálcio (CaCO₃):

- a) Águas moles: < 50 ppm de CaCO₃;
- b) Águas moderadamente moles: (50-100)ppm de CaCO₃;
- c) Águas levemente duras: (100-150)ppm de CaCO₃;
- d) Águas moderadamente duras: (150-250) de CaCO₃;
- e) Águas duras: (250-350)ppm de CaCO₃;
- f) Águas muito duras: >350 ppm de CaCO₃.

Como se pode observar não é somente o pH da água que deve ser considerado quando se trata de potencial de corrosão, há uma relação com o teor de carbonato de cálcio e com a temperatura destas águas naturais. É comprovado que a velocidade de corrosão de estruturas de aço imersas em águas com temperatura entre 20° e 30° aumenta cerca de 30% (PANOSSIAN,1993).

Nesse sentido estudos tem sido elaborados ao longo do tempo com objetivo de prolongar a vida útil do aço imerso em águas doce ou salgadas. Em 1998 houve a publicação da Norma ISO12944:1998, que trata exclusivamente da proteção do aço contra corrosão por meio de mecanismos de pintura levando em consideração o tipo de estrutura, o ambiente em que estará instalada e os sistemas de preparo de superfície e pintura a serem aplicados de acordo com a estimativa de durabilidade solicitadas pelos contratantes.

Uma pesquisa a referida Norma, na versão 2017, foi realizada para se buscar maiores informações sobre controle e monitoramento da corrosão, neste caso o interesse pela pesquisa está relacionado com a corrosão em substratos metálicos imersos em água. Segundo a Norma ISO 12944:2017, o tipo de água tem elevada importância para o entendimento do processo de corrosão do aço. É necessário ter conhecimento se a água é salgada, salobra ou fresca porque a

corrosividade é influenciada pela concentração de oxigênio, temperatura, animais e vegetais presentes no ambiente.

Na Norma ISO 12944:2017 são descritos três tipos de zonas de imersão, são elas:

a) Zona de *splash*: zona molhada pelas ondas ou pelo *spray*, pode gerar um aumento da corrosão principalmente quando a água for salgada (água do mar).

b) Zona de flutuação: são períodos em que a superfície metálica fica imersa e outros em que a superfície metálica não está imersa e sofre a ação atmosférica associada com o impacto das variações de imersão.

c) Zona de imersão: área permanentemente imersa em água.

Em estruturas imersas em água, normalmente a corrosão é local com categorias de corrosão difíceis de serem identificadas. Contudo, a Norma ISO 12944:2017 apresenta diferentes situações no quadro 1:

Categoria	Ambiente	Exemplo de ambiente e estruturas
Im1	Água doce-fresca	Instalações em rios e plantas de usinas hidrelétricas
Im2	Água do mar ou salobra	Áreas portuárias com estruturas como comportas, eclusas, diques e estruturas <i>offshore</i>
Im4	Água do mar ou salobra (<i>offshore</i>)	Estruturas em plataformas marítimas, tubulações e equipamentos de perfuração e exploração.

Quadro 1: Categorias para imersão em água.

Fonte: Adaptado de ISO 12944-2:2017

Diante do exposto no quadro 1, fica evidenciado que o ambiente de imersão Im4 é o de maior impacto na vida do aço carbono, imerso nestes ambientes. Para cada uma das situações e processos de corrosão a referida Norma indica diferentes tipos de revestimento polimérico que são aplicados durante o processo de manufatura respeitando-se normas rígidas de controle de qualidade.

CONCLUSÃO

O artigo em questão teve por objetivo apresentar os tipos de corrosão segundo a literatura e qualificar os meios corrosivos imersos em água de acordo com normativa internacional. A indústria utiliza o aço em larga escala para os mais variados tipos de construção, ligas metálicas são apresentadas ao mercado para melhorar a performance e a durabilidade de estruturas fabricadas com aço principalmente aquelas sujeitas à ambientes marinhos.

Também é sabido que o ambiente marinho degrada o aço em maior velocidade devido à concentração de cloreto de sódio (NaCl).

Para a proteção do aço imerso nestes ambientes são utilizados alguns tipos de revestimentos poliméricos que prolongam a vida destes equipamentos. Um avanço em termos de economia global com gastos em recuperação destes equipamentos ocorreu com a publicação da Normatização ISO12944:2017 que classifica os ambientes imersivos e orienta sobre processos de metalurgia para a conservação de estruturas que trabalham em ambientes imersivos.

Este artigo apresentou de forma sintetizada os tipos de corrosão e os impactos deste processo natural para a economia global. Atualmente a indústria da proteção anticorrosiva oferece inúmeros recursos para aumentar a durabilidade deste valioso bem para a construção.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, Evandro de Azevedo et al. **Mecanismo do Processo Corrosivo em Aços com Revestimentos Metálico e por Pintura Submetidos a Testes de Corrosão**. In: 7ª COTEQ Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Florianópolis, Set. 2003.

BARDAL, Einar. **Corrosion and protection**. Verlag London Limited. 2004.

CÂNDIDO, Luiz Cláudio. **Patologia**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFOP. Ouro Preto, 2002.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 6ª Edição. São Paulo: ABM, 1998.

FIGUEIREDO, Paulo N. **Aprendizagem tecnológica e performance competitiva**. Rio de Janeiro: FGV, 2003.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC. 1982.

_____. **Corrosão**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: LTC. 2003.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 12944:2017. Paint and varnishes-corrosion, protection of steel structures by protective paint systems. Suíça, 2018.

MACAÉ OFFSHORE. **Corrosão**: um problema de bilhões de dólares. Macaé- RJ. n.18. Disponível em: <http://www.macaeeoffshore.com.br/revista/internas.asp?acao=noticia3&edicao=18>. Acesso em 25 de abril de 2012..

NUNES, Laerce de Paula. LOBO, Alfredo Carlos O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Interciencia, 2007.

NEWMAN, Roger C.; SIERADZKI, Karl. (1994). *Metallic corrosion. Science (New York, N.Y.)*, 263(5154), 1708-9. doi:10.1126/science.263.5154.1708

PANOSSIAN, Zehbour. **Corrosão e Proteção contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas**. 1ª Ed., São Paulo: Manual Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993.

SILVA, Silvio Domingos da; MELQUIADES, Rafael Augusto. **Pintura industrial e manutenção anticorrosiva**. Publicação da Tintas WEG, Rev.02. 2008.

Dados dos Autores:

¹Sandro Antonio Malinowski. Administrador com Especialização em Planejamento Estratégico de Negócios, mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia pelo LACTEC com

linha de Pesquisa em Meio Ambiente e Desenvolvimento. Coordenador e professor dos cursos de Engenharia de Produção e Administração na Faculdade CNEC Campo Largo. Email: 0049.sandromalinowski@cneec.br.

² Jair Henrique Boarão. Graduado em Administração pela Universidade Tuiuti do Paraná (2003). Especialização em Engenharia da produção pela PUC-PR. Atualmente é professor titular - Faculdade Educacional Facear de Araucária, professor titular da Faculdade CNEC de Campo Largo, professor titular SENAI, professor titular Universidade Tuiuti. Email: 0049.jairboarao@cneec.br