

Fabio Domingos Pannoni, Ph.D.
Consultor Técnico - Gerdau Aços Brasil
fabio.pannoni@gerdau.com.br

Parafusos estruturais de aço ASTM A325 tipo 3 na construção em aço

INTRODUÇÃO

A construção em aço cria, por vezes, situações em que diferentes ligas metálicas unidas (por exemplo, por parafusos ou solda) estão presentes em um mesmo sistema. Um bom exemplo é observado nas ligações onde parafusos estruturais “pretos”, galvanizados a fogo, ou, ainda, em aço ASTM A325 tipo 3 (aço patinável) são empregados nas uniões de componentes estruturais em aço carbono comum ou em aço patinável.

Esta mistura de materiais ocorre principalmente por duas diferentes razões: experiência prévia de uso e indisponibilidade local dos itens julgados, a priori, como adequados.

Em certas circunstâncias, que serão detalhadas a seguir, a união de diferentes ligas metálicas pode levar à corrosão acelerada de um dos componentes. Este fenômeno é conhecido como corrosão galvânica, isto é, as diferentes ligas metálicas formam, então, o que se chama de par galvânico. Como resultado da formação de um par galvânico, temos o aumento da velocidade de corrosão do elemento menos nobre do par. Em contrapartida, a liga mais nobre (do par) tem sua velocidade de corrosão diminuída. Este tipo de corrosão pode promover danos “cosméticos” à aparência da liga menos nobre ou, em casos extremos, uma perda de massa considerável, levando à redução drástica da vida útil do componente.

Os aços patináveis são sabidamente “mais nobres” do que os aços estruturais comuns. Isto ocorre devido à sua composição química diferenciada. Eles podem, a princípio, desenvolver corrosão galvânica quando conectados aos aços estruturais comuns – fato extensivamente divulgado na literatura. Seria isto verdadeiro para todas as condições de uso? Não. Isto não é verdadeiro para boa parte das situações vivenciadas pelo engenheiro projetista.

O risco da corrosão galvânica depende de uma série de fa-

tores. Além do aço utilizado, as características do ambiente e o detalhe de projeto são cruciais. É difícil, senão impossível, fazer um julgamento a respeito da compatibilidade de materiais.

O presente artigo descreve os princípios da corrosão galvânica e os principais parâmetros que permitem aos projetistas estimar o risco da corrosão quando utilizam materiais diversos na construção de uma estrutura em aço, especialmente no caso da escolha dos parafusos estruturais.

OS PRINCÍPIOS DA CORROSÃO GALVÂNICA

Para que a corrosão galvânica ocorra, três condições devem ser satisfeitas simultaneamente:

- Duas ou mais ligas metálicas que apresentem diferentes potenciais de corrosão (ou potenciais eletroquímicos) devem ser conectadas;
- A conexão deve ser tal que permita o fluxo de elétrons entre as ligas;
- As ligas metálicas, conectadas “eletricamente”, devem ser banhadas por uma mesma solução condutora de íons – o eletrólito.

A Figura 1 ilustra os três pré-requisitos de forma gráfica.

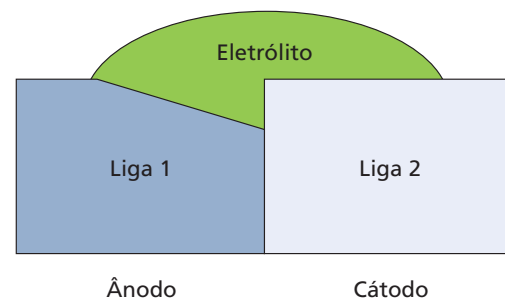


Figura 1: Os três pré-requisitos da corrosão galvânica: ligas metálicas com diferentes potenciais de corrosão, conectadas eletricamente e banhadas pelo mesmo eletrólito

Se a corrosão galvânica puder se desenvolver, a liga menos nobre – o ânodo – é preferencialmente corroída. Em oposição, a liga mais nobre – o cátodo – é protegida. Sua taxa de corrosão diminui muito. De fato, o princípio da proteção catódica é baseado em ânodos de sacrifício, promovendo a proteção a partir da corrosão.

O contato das duas ligas metálicas, com diferentes potenciais eletroquímicos, imersos em um eletrólito, leva ao desenvolvimento de um fluxo de elétrons do ânodo para o cátodo. As reações eletroquímicas são as mesmas que ocorrem enquanto as ligas metálicas estão isoladas, expostas ao ambiente particular – reações anódicas e catódicas. Entretanto, a corrosão sobre o ânodo é acelerada. Em alguns casos, a formação de elementos galvânicos (conhecidos como “pares galvânicos” ou “pilhas galvânicas”) pode levar à corrosão em ligas que seriam resistentes à corrosão em dado ambiente. Este pode ser o caso de ligas consideradas passivas em ambientes atmosféricos, como alumínio, que pode ser levado à corrosão pela formação de pares galvânicos. Em tais casos, a corrosão localizada (como a corrosão por frestas ou pites) pode ser observada, o que não ocorreria sem que houvesse alteração de potencial, usada pela formação de um par galvânico.

Contrariamente ao que se acredita, a diferença de potencial existente no par galvânico, por si só, não é um bom indicador do risco da ocorrência deste tipo de corrosão. Ela somente indica quando este risco deve ser considerado. Neste contexto, deve ser lembrado que as várias tabelas publicadas – chamadas de “Série Eletroquímica”, somente oferecem uma aproximação à questão da diferença de potenciais. O fator decisivo não é diferença de potencial observada em condições experimentais normatizadas, rigidamente controladas, mas a diferença real de potencial, de ligas reais, sob condições reais. Esta é a razão pela qual as tabelas empíricas de “Série Galvânica” foram feitas para certo número de ambientes típicos – como, por exemplo, a água do mar.

A Figura 2 ilustra a série galvânica para água do mar a 25°C.

Grafite
Titânio
Aços inoxidáveis (passivos)
Bronze níquel alumínio
Cuproníquel (70/30 e 90/10)
Bronzes
Latões
Estanho
Chumbo
Ferro fundido austenítico
Aços inoxidáveis (ativos)
Ferro fundido
Aços estruturais patináveis
Aços estruturais
Ligas de alumínio
Zinco
Magnésio

Figura 2: Série galvânica para diferentes ligas imersas em água do mar a 25°C

O conhecimento dos fatores necessários ao desenvolvimento da corrosão galvânica e entendimento dos exemplos relacionados na Figura 3 torna possível a determinação de ações preventivas, que serão discutidas a seguir.

FATORES RELEVANTES AO DESENVOLVIMENTO DA CORROSÃO GALVÂNICA

De acordo com a Lei de Faraday, os processos de corrosão eletroquímica estão diretamente relacionados à transferência de cargas elétricas, isto é, ao fluxo de correntes. Correntes ou densidades de corrente são, assim, frequentemente utilizadas para medir a velocidade de corrosão. Se as condições para a ocorrência da corrosão galvânica forem satisfeitas, em princípio, a corrente de corrosão total, I_{tot} , é composta de uma corrente parcial de “auto-corrosão” I_s (isto é, a parte da corrosão que independe do contato com a outra liga metálica) e a corrente parcial da cela, I_{el} , (isto é, a parte da corrosão originada pela união das ligas metálicas que compõe o par galvânico). Isto é descrito pela Equação 1:

$$I_{tot} = I_s + I_{el} \quad \text{Equação 1}$$

A intensidade da corrosão em dado elemento é determinada pela diferença de potencial entre os dois metais (ΔV), a resistência do eletrólito (R_{el}) e a resistência de polarização no ânodo ($R_{p,a}$) e no cátodo ($R_{p,c}$), respectivamente (Equação 2):

$$I_{el} = \frac{\Delta V}{R_{el} + R_{p,a} + R_{p,c}} \quad \text{Equação 2}$$

Podemos fazer inferências, utilizando a Equação 2, a respeito dos fatores que determinam a corrosão galvânica. Estes fatores são críticos na avaliação da possível ocorrência ou não da corrosão galvânica. O efeito destes fatores será discutido individualmente a seguir.

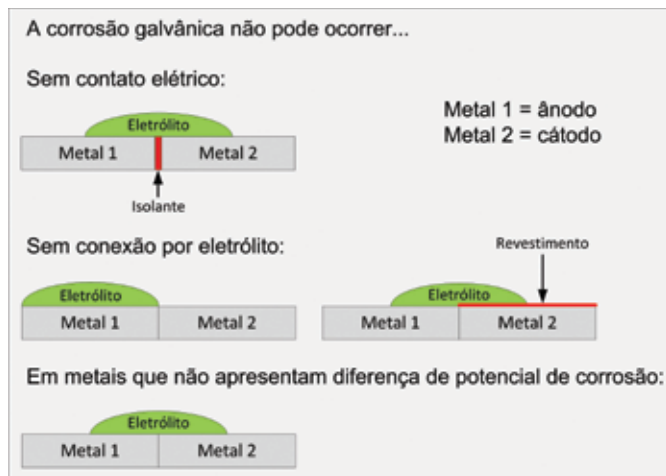


Figura 3: Condições nas quais a corrosão galvânica não pode ocorrer

RESISTIVIDADE DO ELETRÓLITO

O risco da corrosão galvânica diminui com o aumento da resistividade do eletrólito. Isto acontece porque o alcance da corrente galvânica (iônica no eletrólito) é reduzido e a mudança de potencial (V) no ânodo é limitada, tal como ilustrado na Figura 4.

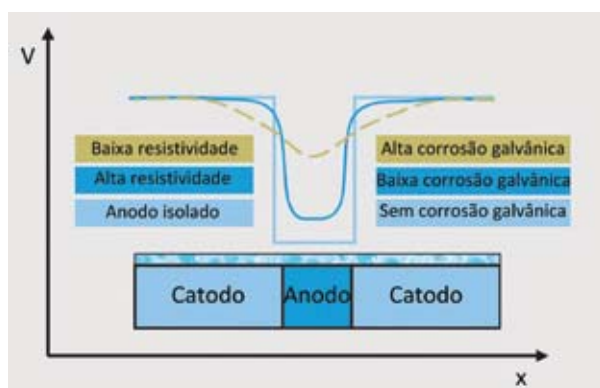


Figura 4: Influência da resistividade do eletrólito sobre a corrosão (ou, despolarização) do ânodo (V corresponde ao potencial medido).

É importante lembrar que a resistividade é inversamente proporcional à quantidade de sais dissolvidos em solução. Ambientes mais poluídos levam a eletrólitos de menor resistividade e vice-versa.

Para eletrólitos com maior resistividade (como películas de água resultantes de condensação de vapor de água, como o orvalho), haverá, conseqüentemente, uma menor velocidade de corrosão. Assim, quanto mais sais dissolvidos no eletrólito, maior será a corrosão do ânodo, causada pelo efeito galvânico.

Ambientes atmosféricos classificados como de muita alta agressividade, industriais ou marinhos (C5-I e C5-M, segundo a norma ISO 9223) são aqueles em que, devido à menor resistividade do eletrólito superficial, a corrosão galvânica se desenvolve com certa frequência. A Tabela 1 traz valores específicos de condutividade (o inverso da resistividade), para vários tipos de eletrólitos aquosos.

Ambiente	Condutividade específica ($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)
Água pura	$5 \cdot 10^{-8}$
Água desmineralizada	$2 \cdot 10^{-6}$
Água de chuva	$5 \cdot 10^{-5}$
Água potável	$2 \cdot 10^{-4}$ a $1 \cdot 10^{-3}$
Água salobra	$5 \cdot 10^{-3}$
Água do mar	$3,5 \cdot 10^{-2}$ a $5 \cdot 10^{-2}$

Tabela 1: Valores típicos de condutividade específica em diferentes tipos de água

DURAÇÃO DO UMEDECIMENTO

Existe uma forte interação entre a resistividade do eletrólito e a duração do umedecimento. Menor resistividade implica em maior quantidade de sais em solução no eletrólito que, por sua vez, resiste mais ou menos à desidratação completa. Não é possível secar completamente uma superfície metálica previamente exposta, por exemplo, à deposição de sais marinhos (a névoa salina). Isto é de grande importância sempre que os componentes do par galvânico não estiverem permanentemente umedecidos por líquidos aquosos. Como descrito anteriormente, a película de eletrólito desempenha papel fundamental no processo. Sem a película, a corrosão galvânica não ocorrerá.

Isto implica, na prática, que qualquer combinação de materiais metálicos não é problema, a princípio, desde que não exista película de eletrólito presente. Esta é uma situação típica para interiores sem condensação. Componentes de ilumina-

ção (por exemplo, lustres), em ambientes interiores, costumam unir diferentes ligas metálicas (latão, alumínio, etc.). A corrosão galvânica raramente é observada nestas condições. De modo geral, ambientes secos, aerados (e, eventualmente, aquecidos) não impõe restrição à união de diferentes ligas metálicas. A Figura 5 ilustra um caso de união de aço inoxidável com aço carbono pintado em um ambiente interior. Não haverá o desenvolvimento de corrosão galvânica.

O tempo de exposição à determinada umidade e a resistividade do eletrólito depende das condições locais. Em ambientes marinhos, industriais ou internos às piscinas cobertas, por exemplo, a probabilidade da ocorrência da corrosão galvânica é significativamente maior que em condições mais brandas, como aquelas observadas nos ambientes rurais ou mesmo de cidades médias a grandes (agressividade atmosférica classificada como C2 e C3 segundo a ISO 9223). A Tabela 2 mostra a influência do ambiente sobre a velocidade de corrosão do zinco, com e sem contato com o aço inoxidável – um par galvânico normalmente considerado “perigoso”. Podemos observar que a parcela da corrosão proporcionada pela formação do par galvânico (isto é, a diferença entre as velocidades de corrosão entre componentes isolados e unidos) excede a da auto-corrosão (isto é, a velocidade de corrosão do zinco sem qualquer contato com o aço inoxidável) em atmosferas marinhas e regiões sujeitas à forte deposição de sais marinhos.



Figura 5: Eletrólitos são, de modo geral, ausentes em ambientes internos aerados e aquecidos. A combinação de ligas metálicas tais como aços inoxidáveis e aços carbono (pintado ou não) não envolvem riscos do aparecimento da corrosão galvânica.

Além do ambiente em si, detalhes de projeto desempenham um papel decisivo na proteção. Fatores que auxiliam a secagem rápida de películas de unidade (aeração adequada, prevenção de frestas, drenagem das águas, etc.) reduzem o risco da corrosão. Áreas permanentemente úmidas, contidas em frestas, áreas protegidas (mas contendo água estagnada)

ou superfícies contendo resíduos tais como terra, podem acelerar consideravelmente a corrosão galvânica.

Situação	Velocidade de corrosão, micrometros/ano			
	Atmosfera urbana	Atmosfera industrial	Atmosfera marinha	Região de arrebentação costeira
Aço carbono galvanizado a quente	2,5	6,5	5,1	10,2
Aço carbono galvanizado a quente conectado a aço inoxidável (razão de superfície ânodo/cátodo = 1:6)	3,0	8,5	10,1	27,0

Tabela 2: Velocidades de corrosão do aço carbono galvanizado a quente com e sem contato com aço inoxidável, em diferentes ambientes

A CINÉTICA DAS REAÇÕES DE ELETRODO

A cinética das reações de eletrodo (entenda-se velocidade de corrosão) é sintetizada na Equação 3. Diferenças de potencial por vezes consideradas pequenas, como 100 mV, podem levar à corrosão, enquanto ligas metálicas com diferenças de potencial consideravelmente mais elevadas (por exemplo, 800 mV) podem ser unidas sem dificuldade. Por que isto acontece?

De fato, a diferença de potencial não fornece informação sobre a cinética da corrosão galvânica. A cinética da reação depende da liga metálica em particular. O titânio, por exemplo, permite que a reação de redução de oxigênio sobre sua superfície ocorra de modo muito mais lento que sobre o cobre. Isto explica porque o aço carbono corrói mais rapidamente em contato com o cobre do que com o titânio, embora este último esteja situado no “limite” da série galvânica. Neste contexto, a formação de películas de corrosão desempenha um papel decisivo. Elas podem alterar significativamente o potencial de uma liga metálica e ser obstáculo à reação parcial anódica e/ou catódica.

ÁREA DO CÁTODO E ÂNODO

Este é um ponto crítico quando se pensa em parafusos e consumíveis de soldagem, em geral. Um importante fator no cálculo da densidade da corrente da cela galvânica, I_{el} (corrente de cela relacionada à área) é a razão das áreas superficiais catódica (A_c) e anódica (A_a). Ela influencia tremendamente a velocidade da corrosão galvânica (Equação 3):

$$I_{el} = \frac{A_c \cdot \Delta V}{A_a + R_{el} + R_{p,c}}$$

Equação 3

Sempre que a área superficial do cátodo (o componente mais nobre do par galvânico) for muito menor do que a área superficial do ânodo (a liga metálica menos nobre), nenhuma mudança no comportamento frente à corrosão é costumeiramente observada. Esta situação é ilustrada na Figura 6.

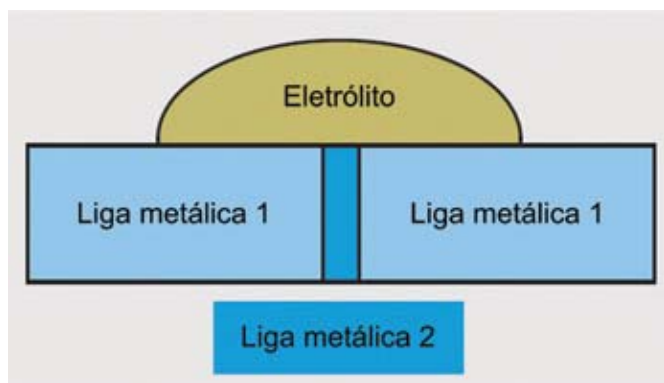


Figura 6: Enquanto a área superficial do cátodo (Liga metálica 2) for pequena comparada à do ânodo (Liga metálica 1), nenhum dano é observado ao ânodo (Liga metálica 1)

Exemplos típicos podem ser encontrados quando parafusos de aço ASTM A325 tipo 3 (aço patinável) são utilizados em componentes de aço carbono. Não há corrosão dos componentes de aço carbono e a ligação é preservada. A Figura 7 ilustra uma situação ainda mais extrema – a união de aço carbono galvanizado a quente com aço inoxidável, sem problemas de origem galvânica. Mesmo em ambientes relativamente agressivos (classificação C4, segundo a ISO 9223), não há corrosão galvânica.

Sob condições atmosféricas, torna-se, por vezes, difícil quantificar as proporções ativas das superfícies anódicas e catódicas de uma estrutura. Para uma avaliação prática, entretanto, isto é desnecessário. Normalmente, basta considerar o sistema em geral. Na combinação de materiais, parafusos devem ser sempre feitos de materiais mais nobres, de modo que a superfície catódica seja pequena. Este conceito está descrito em muitos livros que tratam do tema corrosão – e possui forte embasamento teórico. Assim, o uso de parafusos (e consumíveis de solda) com características “patinaíveis”, em estruturas de aço patinável ou não, garante a integridade estrutural do conjunto ao longo do tempo.

A situação oposta, entretanto, pode causar problemas. Se um ânodo pequeno for conectado a um grande cátodo (por exemplo, um parafuso de aço carbono – galvanizado ou não – conectado a componentes estruturais de aço patinável), a corrosão galvânica poderá ocorrer (Figura 8).

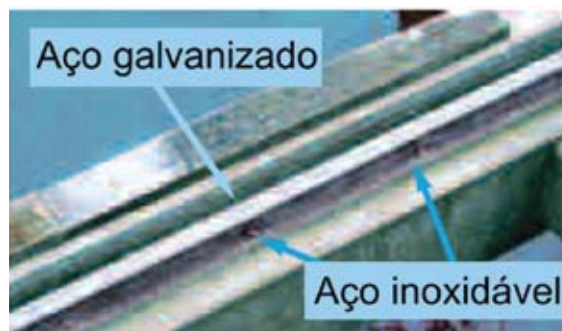


Figura 7: Parafusos de aço inoxidável conectados em componentes de aço carbono de área superficial muito maior não promovem a corrosão galvânica. Em ambos os casos, as conexões estão em ambiente externo, classificado segundo a norma ISO 9223 como C3 (ambiente de alta agressividade)

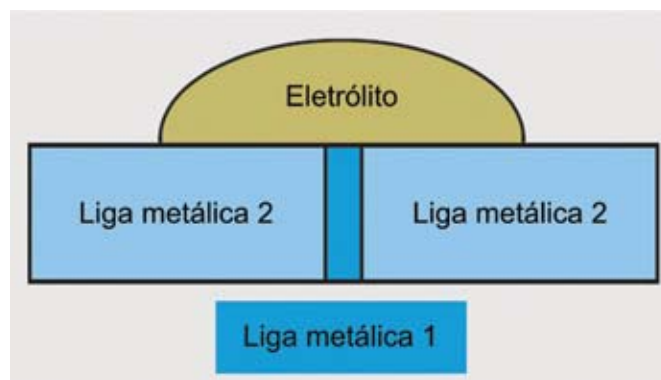


Figura 8: A corrosão galvânica pode ocorrer se a área superficial do ânodo (Liga metálica 1) for pequena, e a do cátodo grande. Este é o caso da utilização de parafusos estruturais “pretos” ou galvanizados a quente em estruturas de aço patinável

EXPERIÊNCIA PRÁTICA

Existe uma grande quantidade de informação na literatura a respeito da combinação dos aços carbono com diferentes ligas metálicas, em diferentes ambientes. A Tabela 3 traz algumas destas informações disponíveis na literatura.

A corrosão galvânica de componentes expostos à atmosfera somente pode ocorrer durante os períodos de exposição à umidade. A superfície não precisa entrar em contato diretamente com, por exemplo, chuva. A deposição de sujeira e fuligem tem influência significativa sobre os períodos de umidade, pois, através de vários mecanismos, mantém a superfície umedecida permanentemente.

Frestas pouco aeradas podem levar à presença constante de umidade. Em contraste com os elementos imersos em sistemas aquosos, o desenvolvimento da corrosão galvânica atmosférica somente ocorre em uma área bastante limitada, próxima do ponto de união das duas ligas metálicas. A corrosão ocorre, neste caso, somente em uma pequena região, ao longo da linha de contato, sem que a maior parte da superfície metálica restante desempenhe qualquer papel efetivo.

CONCLUSÕES

1. A corrosão galvânica é um fenômeno eletroquímico que somente se manifesta quando duas ou mais ligas metálicas que apresentam diferentes potenciais eletroquímicos, conectadas “eletricamente”, são banhadas por um mesmo eletrólito;

2. As conhecidas “Tabela de Potenciais de Eletrodo Padrão” ou as “Tabelas de Série Galvânica” não são, por si só, indicadores da possível ocorrência da corrosão galvânica;

3. Os fatores mais importantes para o desenvolvimento da corrosão galvânica são, por ordem de importância:

a. Área relativa dos componentes anódicos e catódicos. Sempre que a área do ânodo for muito maior (> 10x) que a do cátodo, nenhuma corrosão galvânica ocorrerá em ambientes classificados pela norma ISO 9223 como de muito baixa agressividade (C1), baixa agressividade (C2, média agressividade (C3) e alta agressividade (C4). O inverso é potencialmente perigoso: grandes áreas catódicas (> 10x) conectadas a pequenas áreas anódicas poderão levar ao desenvolvimento da corrosão galvânica, para as mesmas condições ambientais descritas;

b. Resistividade do eletrólito. O risco da corrosão galvânica diminui grandemente com o aumento da resistividade do eletrólito. Eletrólitos gerados em ambientes rurais (classificação C2) e urbanos (classificação C3 e C4), não favorecem o aparecimento da corrosão galvânica. Em contrapartida, os ambientes industriais e marinhos (C5-I e C5-M, respectivamente) merecem atenção.

4. Parafusos estruturais de aço ASTM A325 tipo 3 (aço patinável) podem - e devem - ser os escolhidos nas ligações de estruturas confeccionadas em aço estrutural comum ou aço patinável. Isso se deve ao fato de que, quando aplicados em estruturas constituídas em aços estruturais, garantem a integridade da

PAR METÁLICO		AMBIENTE	RAZÃO DE ÁREAS	VELOCIDADE DE CORROSÃO
AISI 430 (inoxidável)	Aço carbono	Água potável (imersão)	1:1	0,47 mm/ano
	Aço patinável			0,29 mm/ano
	Zinco (99,9%)			0,17 mm/ano
	Alumínio (99,5%)			0,18 mm/ano
AISI 321 (inoxidável)	Aço carbono	Água do mar (imersão)	1:1	0,38 mm/ano
	Zinco (99,9%)		1:10	0,25 mm/ano
			10:1	1,10 mm/ano
	Titânio (99,5%)		1:1	0,61 mm/ano
ASTM A588 (patinável)	Isolado (não há par)	Atmosfera rural	Isolado	0,04 mm/10 anos
		Atmosfera industrial	Isolado	0,05 mm/10 anos
ASTM A36 (estrutural)	Isolado (não há par)	Atmosfera rural	Isolado	0,14 mm/10 anos
		Atmosfera industrial	Isolado	0,20 mm/10 anos
ASTM A588 (patinável)	ASTM A36 (estrutural)	Atmosfera rural	1:10	0,03 mm/10 anos (A588)
				0,17 mm/10 anos (A36)
			10:1	0,04 mm/10 anos (A588)
				0,21 mm/10 anos (A36)
ASTM A588 (patinável)	ASTM A36 (estrutural)	Atmosfera industrial	1:10	0,14 mm/10 anos (A588)
				0,28 mm/10 anos (A36)
			10:1	0,05 mm/10 anos (A588)
				0,42 mm/10 anos (A36)

Tabela 3: Velocidades de corrosão de algumas ligas metálicas em diferentes meios e com diferentes razões de área

ligação ao longo dos anos. A corrosão não ocorre devido à razão de áreas anódica/catódica favorável. O mesmo pode ser dito para as estruturas constituídas em aços patináveis.

5. Parafusos estruturais de aço carbono (ASTM A325 tipo 1), em contrapartida, não devem ser utilizados em estruturas de aço patinável, sob risco do aparecimento da corrosão galvânica. A razão de áreas (anódica/catódica) não favorece esta aplicação. O mesmo pode ser dito em relação ao uso destes mesmos parafusos, galvanizados a quente. ■

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

- X. G. Zhang, “Galvanic Corrosion”. In: Uhlig’s Corrosion Handbook, 3rd. edition, Editor R. Winston Revie, John Wiley, Hoboken, N.J., 2011.
- H. Kaesche, “Metallic Corrosion – Principles of Physical Chemistry and Current Problems”, Tradução de R. A. Rapp, National Association of Corrosion Engineers – International (NACE), 1985.
- V. Kucera e E. Mattson, “Atmospheric Corrosion of Bimetallic Structures”. In: Atmospheric Corrosion, Editor W.H. Ailor, John Wiley, New York, 1982.
- H.E. Townsend, C.D. Gorman e R.J. Fischer, *Atmospheric corrosion performance of hot-dip galvanized bolts for fastening weathering steel guiderail*, Corrosion 98, NACE International, paper no. 344.
- K.P. Fischer, *A review of offshore experiences with bolts and fasteners*, Corrosion 2003, NACE International, paper no. 3017.