

CAPÍTULO 7

A corrosão na seleção do cobre e suas ligas

7.1 CORROSÃO

O comportamento químico do cobre merece ênfase por se tratar de um material com elevada resistência à corrosão, o que o torna imprescindível para aplicações que requerem tal comportamento e, muitas vezes, que combinem com seu comportamento elétrico e/ou térmico.

A taxa de deterioração do cobre é menor quando comparada a de outros elementos, pois, em condições de exposição ao meio atmosférico comum, é formada uma camada protetora, cuja coloração esverdeada é característica em diversas construções, como a estátua da liberdade em Nova York e a Catedral da Sé em São Paulo.

Basicamente, a *corrosão* pode ser definida como um processo de destruição do material pela ação do meio ambiente, em maior ou menor intensidade, quer se refira a meio gasoso, líquido ou sólido. O *meio gasoso* pode ser a atmosfera rural, marítima ou urbana, a atmosfera limpa ou poluída e os gases químicos; o *meio líquido* pode ser água doce ou salgada, pura ou poluída, soluções químicas aquosas, chuva ácida, produtos químicos orgânicos e inorgânicos líquidos; e o *meio sólido* pode ser solo seco ou úmido, natural ou poluído e substâncias químicas sólidas.

Algumas definições básicas sobre corrosão são:

- 1) os materiais orgânicos são menos corrosivos do que os inorgânicos quando em contato com os materiais metálicos, que são muito reativos;
- 2) condições de temperatura e pressão mais elevadas aceleram o processo corrosivo, propiciando maiores taxas de corrosão; e

- 3) determinado meio pode ser extremamente corrosivo para um material e inofensivo para outro (por exemplo, os ácidos são muito corrosivos para a maioria dos metais, mas não para o cobre). Uma exceção é o ácido nítrico (HNO_3), uma vez que o nitrogênio é um oxidante para o cobre, o que propicia sua corrosão. Isso explica por que a maioria dos reagentes utilizados nos ataques químicos para revelar a microestrutura do cobre e suas ligas contém ácido nítrico na composição. Ressaltando que o princípio básico do ataque químico é corroer determinadas regiões da microestrutura para posterior visualização com auxílio de microscópio adequado.

Conforme citado, os meios de corrosão podem ser numerosos, mas a incidência da corrosão em meio aquoso é maior. Como exemplo, cita-se a *corrosão aquosa*, que tem a água como o principal solvente e ocorre por intermédio da condensação da umidade em uma superfície. No caso do cobre e suas ligas, esses materiais sofrem corrosão acentuada em presença de soluções amoniacais e ácidos nítricos.

Especificamente, o fenômeno corrosivo representa uma situação em que duas ou mais reações eletroquímicas diferentes ocorrem simultânea e espontaneamente, sendo pelo menos uma de natureza *anódica* e outra *catódica*. A reação anódica de *dissolução do metal* fornece elétrons à reação catódica de *redução*, gerando uma carga elétrica transferida por unidade de tempo. Para que a reação de dissolução do metal tenha prosseguimento é necessário que os elétrons produzidos sejam removidos; caso contrário, ocorre equilíbrio eletroquímico. A reação de redução de hidrogênio que ocorre simultaneamente só tem prosseguimento se receber elétrons. Dessa forma, os elétrons produzidos pela reação de dissolução do metal são utilizados pela reação de redução do hidrogênio, e as reações têm prosseguimento.

A Figura 7.1 mostra o mecanismo eletroquímico de corrosão, envolvendo eletrodos de dois metais, cobre e ferro (base para os aços e ferros fundidos). Os eletrodos estão expostos a um eletrólito, uma solução aquosa capaz de formar cátions e ânions, e contém indicadores das áreas catódica e anódica, provenientes do processo eletroquímico. A conexão entre os eletrodos foi realizada por um fio de cobre. É importante destacar que os eletrodos de ferro e cobre são imersos em uma solução eletrolítica ácida sem metais inicialmente.

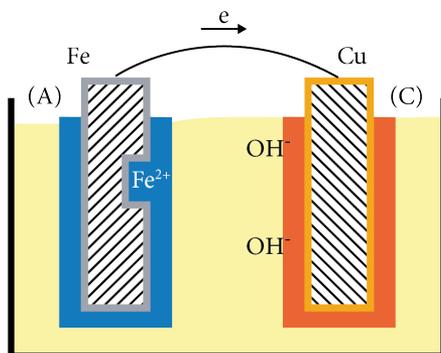


Figura 7.1 – Mecanismo eletroquímico de corrosão do cobre e ferro. Adaptado de Gentil (2011).

Em termos de reação de oxidação (corrosão), o potencial-padrão para o ferro oxidar é $-0,440\text{ V}$ e para o cobre oxidar é $+0,340\text{ V}$ (Figura 7.3). O cobre é muito mais catódico que o ferro e, por isso, apresenta menor tendência a corroer. O eletrodo de ferro é o ânodo (A), no qual ocorre a oxidação (perda de elétrons), destacada pela região em azul; e o cátodo (C) é o eletrodo de cobre, no qual ocorre a redução (ganho de elétrons), formando uma região protetora com coloração alaranjada.

A perda de elétrons do ferro consiste em corrosão (oxidação) e ocorre devido à diferença de potencial entre os eletrodos de ferro e de cobre. Em função disso, verifica-se um fluxo de elétrons do ferro (ânodo) para o cobre (cátodo), gerando, portanto, uma reação química de oxirredução com envolvimento de elétrons, o que caracteriza um processo eletroquímico. A pilha com eletrodos metálicos diferentes é conhecida como pilha galvânica; portanto, é usual o termo corrosão galvânica ou bimetálica para esses casos.

Os possíveis problemas gerados pela corrosão de materiais metálicos aos produtos incluem perda de qualidade na aparência, interrupção do funcionamento, contaminação, perda em manufatura ou já fabricados, redução da segurança, elevação do custo de manutenção etc.

Em termos gerais, as cerâmicas são materiais que apresentam menor reatividade química do que os polímeros, e os metais são os mais reativos quimicamente. Estes merecem destaque na análise de corrosão de materiais, porque possuem elétrons livres que podem gerar pilhas eletroquímicas dentro de suas estruturas, o que normalmente gera corrosão. A corrosão dos metais é uma forma de extração metalúrgica ao contrário, cujo processo é favorecido pelas menores energias dos metais na condição de óxidos, sulfitos, carbonatos ou silicatos.

A *resistência à corrosão* pode ser definida como a propriedade de um material metálico de evitar danos causados por outros materiais que possam deteriorá-lo. O efeito da oxidação direta de um metal é o dano mais importante observado. Também merece destaque a resistência do material à corrosão química.

Por ser irregular, é muito difícil medir a corrosão. A unidade mais comum utilizada é polegadas, centímetros ou milímetros de superfície perdida por ano. Outra forma de medida está relacionada à profundidade de penetração (por exemplo, nas unidades de milímetros por ano).

A necessidade de utilização de metais em altas temperaturas e em meios altamente corrosivos, como a água do mar para a indústria petrolífera, tem levado à obtenção de novas ligas especiais e à utilização de tratamentos superficiais específicos para essas aplicações, com destaque para ligas especiais de cobre, como o bronze-alumínio-níquel.

Além da deterioração por corrosão, as reações eletroquímicas estão presentes em processos industriais como a eletrodeposição (ou galvanoplastia), que adiciona um revestimento fino de um metal (por exemplo, cobre) na superfície de outros (aço ou zinco, por exemplo) para fins de proteção superficial.

Curiosidade

Do ponto de vista da área da saúde, o *cobre* é um metal com espetacular habilidade de matar germes. Os íons de cobre possuem elevada capacidade de eliminar microrganismos nocivos à saúde humana. Por exemplo, quando a membrana de uma superbactéria que contém carga elétrica entra em contato com o cobre, ocorre um tipo de curto-circuito. Nesse caso, o cobre invade esse microrganismo e destrói seu DNA (ácido desoxirribonucleico); sem o DNA, não há crescimento nem mutação. Em contrapartida, em função de seu comportamento químico, o cobre não pode ser aplicado como biomaterial (em próteses, por exemplo).

7.2 TIPOS DE CORROSÃO

Os processos corrosivos de natureza eletroquímica apresentam mecanismos idênticos uns aos outros, porque constituem áreas anódicas e catódicas, entre as quais circulam uma corrente de elétrons e uma de íons. Entretanto, a perda de massa e o modo de ataque sobre o material se dão por formas diferentes. Os principais tipos de corrosão são mostrados na Figura 7.2 e descritos na sequência: uniforme, intergranular, em placas, alveolar, por pites e filiforme. Adicione a corrosão galvânica, que recebe destaque neste capítulo.

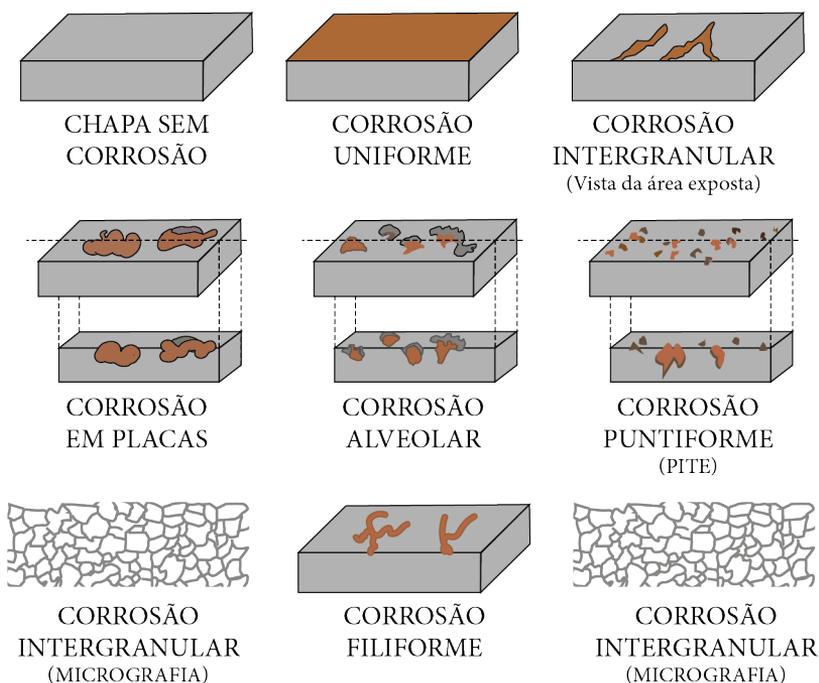


Figura 7.2 – Principais tipos de corrosão. Adaptado de Zurlo (2016).

A *corrosão uniforme* consiste no ataque de toda a superfície metálica em contato com o meio corrosivo e na consequente perda de material, evidenciada pela diminuição da espessura. Esse tipo de corrosão se processa de modo generalizado em toda a superfície e é uma forma comum em metais que não formam películas protetoras, como resultado do ataque. A corrosão uniforme ocorre em geral devido a micropilhas de ação local e é provavelmente o tipo mais comum de corrosão, em particular nos processos corrosivos de estruturas expostas à atmosfera e outros meios que ensejam uma ação uniforme sobre a superfície metálica. A corrosão uniforme é uma forma de desgaste de mais fácil acompanhamento, em especial quando se trata de corrosão interna em equipamentos ou instalações, tendo em vista que a perda de espessura é aproximadamente a mesma em toda a superfície metálica.

A *corrosão intergranular* ocorre quando existe um caminho preferencial para a corrosão na região dos contornos de grão. Nesse caso, os grãos vão sendo destacados à medida que a corrosão se propaga. O principal fator responsável pela diferença na resistência à corrosão da matriz (material no interior do grão) e do material vizinho ao contorno é a diferença na composição química nesses locais. Esse tipo de corrosão ocorre com maior frequência em aços inoxidáveis e ligas de alumínio. No caso das ligas alumínio-cobre, os precipitados Al_2Cu são mais nobres que a matriz e aparentemente agem como cátodos, acelerando a corrosão da região vizinha ao contorno de grão, empobrecida em cobre. Eliminando os precipitados, elimina-se a causa da corrosão intergranular. Entretanto, no caso das ligas de alumínio mencionadas, os precipitados são imprescindíveis para a elevação da resistência mecânica e da dureza.

A *corrosão em placas* ocorre quando os produtos de corrosão formam placas que se desprendem de forma progressiva. É um tipo de corrosão comum em metais que formam película inicialmente protetora, mas que, ao se tornarem espessas, fraturam e perde aderência, expondo o metal a um novo ataque.

A *corrosão alveolar* ocorre quando o desgaste provocado pela corrosão se dá de forma localizada, com o aspecto de crateras. É um tipo de corrosão frequente em metais formadores de películas semiprotetoras ou em corrosão sob depósito, como no caso da corrosão por aeração diferencial.

A *corrosão por pites* (ou *puntiforme*) é uma forma de corrosão localizada que consiste na formação de cavidades de pequena extensão e razoável profundidade. Ocorre em determinados pontos da superfície; no entanto, o restante pode permanecer quase sem ataque. É um tipo característico de corrosão de materiais metálicos formadores de películas de proteção e resulta, de modo geral, da atuação de sítios ativos-passivos em pontos onde a camada passiva é rompida. O mecanismo de formação dos pites inicia-se em pontos de fragilidade ou defeitos da película de óxido passivante, e o pH no interior do pite altera-se substancialmente no sentido ácido, o que dificulta a restituição da passivação inicial. Surge a pequena área ativa diante de uma grande área catódica, provocando corrosão intensa e localizada. Exemplos típicos são os aços inoxidáveis e as ligas de alumínio em meios que contém cloretos.

A *corrosão filiforme* ocorre sob filmes de revestimentos, especialmente de pintura, que se propagam em direções variadas e não se cruzam. É um tipo de corrosão que se processa muito quando a umidade relativa do ar é maior que 85% e em revestimentos mais suscetíveis à penetração de oxigênio e água ou apresentando falhas.

A *corrosão galvânica*, discutida inicialmente no item 7.1 deste capítulo, é o processo corrosivo resultante do contato elétrico de materiais dissimilares. Quanto mais distantes são os materiais na tabela de potenciais eletroquímicos, em termos de nobreza no meio considerado, mais intenso é o mecanismo. Ele apresenta também grande influência entre as áreas catódica e anódica.

A Figura 7.3 exibe uma série de potenciais-padrão (E_0) de eletrodos, na qual se pode observar seus respectivos potenciais de oxidação. Quanto mais negativo é o potencial-padrão do eletrodo, mais anódico e maior é a tendência para sofrer corrosão (oxidação). Observa-se que o cobre (Cu) é muito catódico em comparação com o ferro (Fe), o que explica porque ele sofre redução enquanto o ferro é corroído, ratificando o fenômeno explicado no mecanismo eletroquímico entre esses dois metais.

	Metal	E_0 (V)
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;">↑ Mais Catódico</div> <div style="margin-top: 10px;">↓ Mais Anódico</div> </div>	Au	+1,420
	Cu	+0,340
	Pb	-0,126
	Sn	-0,136
	Ni	-0,250
	Co	-0,277
	Cd	-0,403
	Fe	-0,440
	Cr	-0,744
	Zn	-0,763
Al	-1,662	
Mg	-2,262	
Na	-2,714	
K	-2,924	

Figura 7.3 – Série de potenciais-padrão de eletrodos de importantes metais, em temperatura ambiente. Adaptado de Callister e Rethwisch (2014).

Por meio da análise da Figura 7.3, compreendemos por que, em uniões bimetálicas com contato direto entre cobre e aço (liga à base de ferro), o aço está propício à corrosão (oxidação) e o cobre à redução. A diferença de potencial de redução entre o cobre e o alumínio é ainda maior; logo, em aplicações de contato, o alumínio está propício ao processo de oxidação (corrosão).

Outra observação importante é que a área corroída em um par galvânico de metais dissimilares é denominada área anódica, e que uma área maior significa corrosão menos concentrada. Também é possível constatar também que o cobre não pode ser utilizado como material de sacrifício para um componente ou peça de aço e que, em termos de comportamento mais anódico do que o ferro, o magnésio é mais recomendável para essa finalidade do que o alumínio, por exemplo.

A Tabela 7.1 apresenta, de baixo para cima, materiais catódicos relevantes, como o bronze de silício, o bronze fosforoso, o latão almirantado, o cuproníquel e o latão vermelho. Isso evidencia o importante comportamento químico do cobre e suas ligas no que diz respeito à resistência à corrosão.

Tabela 7.1 – Série galvânica prática de materiais em água de mar. Adaptado de Callister e Rethwisch (2014)

Anódico	Magnésio	Anódico	Latão naval 464
	Revestimento de zinco		Latão amarelo
	Berílio		Revestimento de latão
	Cádmio		Latão vermelho
	Urânio (puro)		Molibdênio
	Alumínio		Cuproníquel
	Índio		Latão almirantado
	Estanho		Bronze fosforoso
	Chumbo		Monel 400
	Aço		Aço inoxidável 316 (ativo)
	Ferro fundido		Bronze de silício
	Níquel (ativo)		Aço inoxidável 304 (passivo)
	Cobre		Aço inoxidável 316 (passivo)
	Níquel (passivo)		Titânio
	Revestimento de cromo		Prata
	Tântalo		Ouro
	Aço inoxidável 304 (ativo)		Platina
	Tungstênio		Paládio
	Nióbio com 1% de zircônio		Grafite
	Urânio com 8% de molibdênio		
Catódico		Catódico	

Dentro da corrosão galvânica, pode-se localizar a *dezincificação*. Ela está relacionada ao processo corrosivo que se observa nas ligas com zinco, especialmente nos latões com alto teor de zinco, nos quais a corrosão resulta na destruição do material (mais anódico), restando o cobre na região atacada e apresentando na superfície do latão regiões avermelhadas, locais onde ocorre a corrosão seletiva do zinco. De forma rara, a *desniquelação* consiste na corrosão seletiva do níquel em ligas de cobre (70%) e níquel (30%) em temperaturas acima de 100 °C.

Os principais tipos de corrosão já foram mencionados anteriormente. Contudo, existem mecanismos de corrosão associados ao escoamento de fluidos, podendo citar-se a *corrosão-erosão*, a *corrosão com cavitação* e a *corrosão por turbulência e tribo-corrosão*. Além disso, existe a *corrosão associada a uma tensão* (ou *corrosão sob tensão*), quando um

material é submetido a tensões trativas em um meio corrosivo específico. As condições metalúrgicas do material, como dureza, encruamento e fases presentes, são fatores decisivos. Na corrosão associada a uma tensão, formam-se trincas no material, que podem assumir comportamento intergranular ou transgranular. A corrosão sob tensão intergranular ocorre de preferência nos contornos de grãos, geralmente em decorrência da precipitação de segundas fases nos contornos ou devido a fenômenos de segregação.

7.3 TESTES DE CORROSÃO

É perceptível que o fenômeno corrosivo gera danos, muitas vezes irreparáveis – sem mencionar os gastos que empresas de todo o mundo têm despendido para repará-los. Para evitar esses transtornos, os testes de corrosão são essenciais, porque simulam condições variadas nas quais as peças são aplicáveis. Eles podem ser realizados de diferentes formas, envolvendo intervalos de tempo variados e agregam considerável confiabilidade nos resultados obtidos.

De forma geral, os ensaios de corrosão simulam condições artificiais em laboratórios com aproximações da composição química do meio de ataque ou ainda são realizados em condições de exposição natural no campo de trabalho, onde efetivamente o material é aplicado. Em último caso, os tempos para a obtenção dos resultados são relativamente longos, o que representa, de modo indireto, maiores custos de estudo e pesquisa. No setor industrial, os testes de corrosão acelerada em diversos meios de ataque são utilizados no intuito de reduzir o tempo de resposta dos ensaios.

A seleção do tipo de ensaio depende do objeto de aplicação, do tipo do material aplicado, do tipo de meio ou atmosfera de ensaio e dos parâmetros desejados. Com o processo de globalização e as normalizações de métodos e técnicas no setor industrial, os testes de resistência à corrosão são executados segundo normas apresentadas na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Testes de corrosão normalizados

Norma	Título	Aplicação
ASTM B117	Prática para operações em câmara salina	Alumínio, exposição marinha
ASTM B 368	Teste acelerado para cobre em ácido acético	Liga Cu-Ni-Cr para decoração
ASTM D 2247	Teste de revestimentos em 100% de umidade	Resistência à água
ASTM G 85	Ácido acético	Teste de esfoliação para ligas de alumínio
ASTM G 85	Teste em ciclos em câmara salina com atmosfera acidificada	Teste de esfoliação para ligas de alumínio

ASTM G 85	Teste em câmara salina utilizando água do mar sintética	Alumínio
ASTM G 85	Teste em câmara salina utilizando NaCl e SO ₂	Componentes de aeronaves
ASTM G 85	Teste em câmara salina utilizando ciclo úmido/seco	Manutenção de revestimentos
ASTM G 87/ DIN 50018	Orvalho de SO ₂	Contatos elétricos e telhado
CCT IV	Novo teste de corrosão acelerada	
GM9540P/ B	Novo teste de corrosão acelerada	
MIL H 6088G	Corrosão intergranular	Indústria aeronáutica
SAE J2334	Novo teste cíclico de corrosão	

O desenvolvimento relativamente crescente de novos métodos de produção de componentes resistentes à corrosão requer testes que avaliem o desempenho dos materiais em um curto intervalo. Além disso, os testes acelerados de corrosão podem mascarar ou equivocar o real desempenho e resposta do material, devido à agressividade excessiva da solução. Apesar de os testes de *salt spray* apresentarem boa correlação com os resultados reais, as técnicas eletroquímicas têm sido mais utilizadas para avaliação do desempenho dos materiais frente ao fenômeno corrosivo.

Entre as técnicas eletroquímicas mais utilizadas estão as *curvas de polarização de Tafel* [ASTM G59]. Quando essa técnica não traz informações suficientes ou explícitas, referentes à natureza e tipo do ataque, faz-se necessário o uso de outra técnica, conhecida como *espectroscopia de impedância eletroquímica* (EIE ou EIS, do inglês *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) [ASTM G106], que tem demonstrado aplicabilidade em uma ampla gama de trabalhos com soluções aquosas.

Lobo (2023) realizou uma pesquisa sobre a influência das variáveis térmicas de solidificação sobre a microestrutura e a resistência à corrosão da liga Cu-24%Zn-6%Al-4%Mn-3%Fe. O estudo do comportamento de corrosão foi realizado por meio de ensaios de polarização potenciodinâmica linear. Esse método utiliza um potenciostato que impõe um potencial ao eletrodo de trabalho (que corresponde ao material estudado) em relação a um contraeletrodo fabricado com material inerte e mede a corrente gerada entre os dois.

Na Figura 7.4, são mostradas as curvas de polarização potenciodinâmica de todas as posições do lingote fundido unidirecionalmente, sendo os potenciais de corrosão e as densidades de correntes de corrosão obtidos por meio extrapolação de Tafel em cada uma dessas curvas.

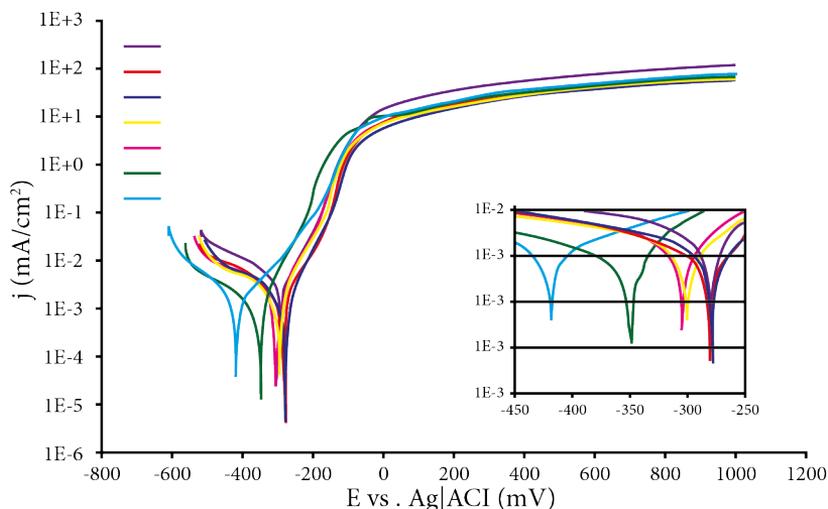


Figura 7.4 – Curvas de polarização potenciodinâmica. (Lobo, 2023)

Os ensaios de polarização potenciodinâmica linear mostraram que menores taxas de resfriamento, que ocorrem de acordo com a distância da parede do molde, proporcionam amostras mais instáveis, com menores potenciais de corrosão e maiores taxas de corrosão, o que pode estar relacionado com a maior heterogeneidade da microestrutura das amostras ao se afastarem da base de troca térmica, devido à maior tendência de acoplamento galvânico entre a matriz e a fase κ rica em ferro e alumínio.

7.4 CONTROLE DA CORROSÃO

Conforme discutido, o cobre e suas ligas normalmente são materiais que possuem melhores comportamentos eletroquímicos frente à corrosão (oxidação) que outros. Os materiais metálicos que não possuem um razoável desempenho frente à corrosão podem apresentar resultados melhores de resistência à corrosão pela utilização de métodos ou técnicas de proteção anticorrosiva, que minimizam a ação e os efeitos corrosivos. No Capítulo 5 desta obra, foram discutidas importantes tecnologias de tratamentos de superfícies que podem ser empregadas em materiais de engenharia para melhoria de resistência à corrosão.

Além da preocupação com as melhorias das propriedades mecânicas, existe também uma preocupação ainda maior no que diz respeito à proteção ou à inibição da ação corrosiva. Uma variedade de peças de cobre ou de suas ligas são aplicadas nos mais diversos setores industriais em função de elevada resistência à corrosão.

Em relação ao combate à corrosão, recomenda-se a adoção de estratégias para o controle da corrosão, as quais são: *bom projeto*, com a seleção de materiais baseada em informações, geometria e configurações; *revestimentos de proteção*, que podem ser

passivos (o revestimento simplesmente exclui o meio corrosivo) e *ativos* (o revestimento protege mesmo quando incompleto); *inibidores de corrosão*, que são produtos químicos adicionados ao meio corrosivo para retardar a taxa da reação da corrosão; e *monitoramento*, que consiste na manutenção preventiva ou substituição regular.

Um exemplo de cuidado no projeto para evitar ou mitigar a corrosão galvânica é a adoção de elementos como buchas, arruelas e gaxetas de isolamento, para que não ocorra o contato direto de peças de cobre e aço. Dessa forma, evita-se o ataque galvânico e a oxidação (corrosão) do aço. Outros exemplos de cuidados com projeto incluem mudanças para evitar fluidos aprisionados, fissuras (que acumulam umidade) e outras complicações.

A tecnologia existente permite a utilização dos materiais em praticamente todos os meios corrosivos com durabilidade dentro de certos períodos desejados. Alguns materiais de elevado uso industrial possuem baixa resistência à corrosão na maioria dos meios, porém ela pode ser melhorada utilizando técnicas ou métodos de proteção anticorrosiva que promovem a *apassivação* ou a *polarização* do material. Regular a corrosão consiste em um razoável controle das *taxas de corrosão* por intermédio da aplicação de inibidores, proteção catódica ou anódica, aplicação e desenvolvimento de revestimentos, modificação estrutural da superfície e modificações e controle do meio corrosivo, como o controle do pH.

Entre as tecnologias de processamento de superfície destaca-se a *galvanoplastia* (*eletrodeposição*), e o *cobre* possui aplicações importantes, como metal de revestimento nobre. Ele é amplamente utilizado sobre aço e zinco, isoladamente ou formando liga, como chapa de latão (zinco).

O *laser* é outro exemplo de tecnologia que pode ser utilizada para atingir melhorias de resistência à corrosão em materiais metálicos. Entre as técnicas com aplicação do laser, destacam-se *LSM* (do inglês *Laser Surface Melting*), *LSA* (do inglês *Laser Surface Alloying*) e a *deposição física a vapor* (PVD, do inglês *Physical Vapor Deposition*).

7.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE CORROSÃO NO COBRE E SUAS LIGAS

Como mencionado, o cobre é catódico em um par galvânico com a maioria dos materiais metálicos, por exemplo aços e alumínio. Existem importantes elementos de liga que podem ser adicionados ao cobre na formação de ligas, gerando incremento de resistência à corrosão, entre eles arsênio (As), que atua como inibidor de corrosão em água do mar, níquel (Ni) ou estanho (Sn), que aumentam a resistência mecânica e a resistência à corrosão.

O *cobre* desoxidado com fósforo (DHP, do inglês *Deoxidized High Phosphorus*), mais conhecido como cobre P122, é utilizado na fabricação de tubos em sistemas de refrigeração e em aplicações cujo controle da corrosão seja importante e não se tenha preocupação com perda da condutividade elétrica.

Os *tombacks* são ligas binárias constituídas por cobre e zinco, que apresentam teores mássicos de zinco de até 20%. São ligas monofásicas (fase alfa) e possuem elevada resistência à corrosão, sobretudo a dezincificação, que ocorre principalmente em soluções salinas, com maior intensidade em meios ácidos.

O *tomback 95/05*, liga UNS C21000 (ou liga 210), trata-se de uma liga binária de cobre formada por 95% de cobre e 5% de zinco, em massa. Possui nome comercial de *Gilding Metal* ou "liga para enfeite e douração". Suas aplicações consistem na fabricação de terminais elétricos, bijuterias, medalhas e adornos, moedas, emblemas, placas, material usado como base para aplicação de ouro e de esmaltes vítreos.

O *tomback 90/10*, liga UNS C22000 (ou liga 220), trata-se de uma liga de cobre formada por 90% de cobre e 10% de zinco, em massa. Conhecida como "bronze comercial" ou "latão vermelho", apresenta características similares ao *tomback 95/05*, com menor custo de matéria-prima, uma vez que o teor de cobre da liga 220 é menor. As aplicações incluem espelhos de fechaduras (peças nobres), componentes náuticos, rebites, parafusos, recobrimento de projéteis, bijuterias em geral, decorações ornamentais, artigos esmaltados, telas, cantoneiras, canaletas, dentre outras aplicações.

O *tomback 85/15*, liga UNS C23000 (ou liga 230), é formado por 85% de cobre e 15% de zinco, em massa, e conhecido comercialmente também como "latão vermelho". Entre os três *tombacks* mencionados, trata-se do mais utilizado, em função da relação custo-benefício, levando em consideração seu menor teor de cobre. Suas aplicações abarcam liga utilizada em munições, frisos, guarnições, cantoneiras, molduras, mangueiras flexíveis, tubulações, recipientes para cosméticos, mostradores para relógios e instrumentos, bijuterias, chapas gravadas, peças destinadas a brasagem, fechaduras, *zípers*, tubulações químicas, soquetes, contadores, dentre outras.

O *latão 70/30*, liga UNS C26000 (ou liga 260), é o latão mais conhecido e utilizado em escala industrial. Recebe a designação 70/30 por ser formado por 70% de cobre e 30% de zinco, em massa. Esta liga é conhecida comercialmente como "latão cartucho", pela sua grande utilização na fabricação de cartuchos de munição. Apesar de ser uma liga monofásica, já possui características bem diferentes dos *tombacks*, começando por sua coloração amarelada. Pode apresentar problemas de dezincificação, dependendo do ambiente de aplicação; em compensação, apresenta a mais favorável combinação de valores elevados de resistência mecânica e ductilidade entre todos os latões. Além da fabricação de cartuchos de munição, outras aplicações incluem a fabricação de moedas, instrumentos musicais, adornos e objetos de decoração.

O *latão 65/35*, liga UNS C27000 (ou liga 270), e o *latão 63/37*, liga UNS C27200 (ou liga 272), referem-se a latões que já podem apresentar uma pequena quantidade de fase beta e não podem ser utilizados em ambientes corrosivos. Entre as aplicações destacam-se peças de veículos automotivos, ferragens residenciais e terminais elétricos.

O *latão 60/40*, liga UNS C28000 (ou liga 280), compreende uma típica liga bifásica (fases alfa e beta), composta por 60% de cobre e 40% de zinco, em massa. A fase beta limita a aplicações em condições não muito corrosivas. As aplicações incluem

fabricação de placas, barras e perfis, na arquitetura em seções estruturadas e painéis espessos, na indústria química em placas de tubos de condensadores e trocadores de calor e componentes mecânicos fabricados por forjamento.

Os *latões especiais* são ligas de cobre e zinco com adição de um ou mais elementos específicos, em que cada elemento de liga lhe confere propriedades específicas, possibilitando incremento na gama de aplicações. O latão aluminado, o latão almirantado arsenical e o latão naval são exemplos de latões especiais com elevada resistência à corrosão.

O *latão aluminado*, liga UNS C68700 ou liga 687, compreende um latão com cerca de 2% de alumínio, em massa. O alumínio melhora a resistência à corrosão da liga, que pode conter ou não arsênio na sua composição, um elemento que aumenta a proteção à corrosão em água salobra. Suas aplicações abarcam trocadores de calor para aplicações em plataforma de petróleo no mar (*offshore*).

O *latão naval*, liga UNS C46400 ou liga 464, compreende uma liga de cobre-zinco-estanho (Cu-Zn-Sn), em que o estanho, apesar de mais fraco do que o alumínio, aumenta a resistência à corrosão da liga. As aplicações incluem material utilizado em peças fundidas de aplicações navais, hélices e lemes de navios, rotores para turbinas movidas à água, buchas, engrenagens e eixos.

O *latão almirantado*, liga UNS C44300 ou liga 443, é similar ao latão naval, também contendo estanho entre seus componentes, além de cobre e zinco. Possui ótima resistência à corrosão, mesmo em águas salgadas, mas pode ser utilizado para aplicações de água doce, salgada ou salobra.

O *bronze* é uma liga formada principalmente de cobre e estanho (tipicamente com cerca de 90% de Cu e 10% Sn, em massa). Outras ligas de cobre do grupo dos bronzes têm sido desenvolvidas, compostas com outros elementos além do estanho, por exemplo o alumínio ou o silício.

De forma geral, o bronze apresenta elevada resistência à corrosão, uma vez que possui o estanho na composição, incrementando essa propriedade. Entretanto, quanto mais estanho presente na composição do bronze, mais dura se torna a liga e mais difícil de ser conformada a quente.

Na sequência, são apresentados bronzes fosforosos (que apresentam determinado teor de fósforo) definidos pela quantidade de estanho e que possuem boa resistência à corrosão. Tratam-se de bronzes dúcteis, que são trabalháveis de forma mecânica por processos de conformação, possibilitando a obtenção de formas de chapas, barras, fios e tubos.

O *bronze fosforoso 511*, liga UNS C51100 ou liga 511, compreende uma liga de cobre com 4% de estanho, em massa, e com pequenos teores de fósforo. Possui uma microestrutura monofásica (fase alfa) e propicia uma boa combinação de trabalhabilidade a frio, resistência mecânica e dureza. Apresenta boa resistência à corrosão, inclusive em condição de corrosão sob tensão. Trata-se de uma liga comumente utilizada em aplicações elétricas como molas condutoras, componentes de interruptores, chaves, contatos e tomadas.

O *bronze fosforoso 510*, liga UNS C51000 ou liga 510, compreende uma liga de cobre com 5% de estanho, em massa, e com pequenos teores de fósforo. Também possui uma microestrutura monofásica, mas sua resistência mecânica é um pouco superior. Trata-se de uma liga utilizada na fabricação de ganchos de chapas de revestimento, tubos para condução de águas ácidas, componentes para a indústria têxtil, química e de papel, molas condutoras e componentes de interruptores e tomadas, molas e diafragmas, parafusos, rebites, porcas, escovas, tubos de manômetros, varetas e eletrodos de soldagem.

O *bronze fosforoso 519*, liga UNS C51900 ou liga 519, compreende uma liga de cobre com 6% de estanho, em massa, e com pequenos teores de fósforo, apresentando também uma microestrutura monofásica. Em termos de propriedades, possui elevada capacidade de trabalhabilidade, excelente resistência à corrosão e maior resistência à fadiga e ao desgaste do que os bronzes 510 e 511. Trata-se de uma liga que pode ser utilizada na fabricação de componentes para as indústrias química, têxtil e de papel, na construção elétrica para molas condutoras e componentes de interruptores; e na construção mecânica em molas e membranas, escovas, tubos de manômetros, engrenagens, componentes de bombas e eletrodos de soldagem.

O *bronze fosforoso 521*, liga UNS C52100 ou liga 521, compreende uma liga de cobre com 8% de estanho, em massa, e com teores de fósforo. É uma liga monofásica, apenas com fase alfa, que, dependendo das condições de processamento, pode conter pequenas quantidades de fase delta. Em função de elevados teores de estanho e de fósforo, apresenta elevada resistência à fadiga e ao desgaste e comportamento de antifricção (diminuindo os efeitos do atrito), além de boa resistência à corrosão. Possui aplicações similares às do bronze fosforoso 519.

Já os *cuproníqueis* são ligas de cobre com 10%, 20% ou 30% de níquel, em massa. São ligas monofásicas (fase alfa) que apresentam elevada resistência à corrosão, principalmente em água marinha. Em relação à composição, contém em geral 2% de ferro e manganês, em massa, com o intuito de elevar a resistência à corrosão. As aplicações dessas ligas de cobre incluem a indústria naval, tubos para condensadores e aquecedores e moedas.

As ligas ternárias cobre-níquel-zinco (Cu-Ni-Zn) também são conhecidas como *alpacas*. Em sua composição em termos mássicos, essas ligas apresentam de 10% a 30% de níquel, com valor típico de 8%, 12% e 18%; 45% a 70% de cobre; e o restante de zinco. De forma geral, as alpacas são constituídas de soluções sólidas homogêneas e apresentam elevada resistência à corrosão.

As *ligas especiais de cobre* são aquelas cujas composições e os processos de fabricação devidamente associados possibilitam aplicações tecnológicas de elevado desempenho em termos de propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, por exemplo. Essas ligas apresentam propriedades tecnológicas superiores às de muitos aços, até mesmo os inoxidáveis. O bronze-alumínio (Cu-Al) e o bronze-silício (Cu-Si) fazem parte do grupo de ligas especiais de cobre.

A liga do sistema cobre-alumínio também é conhecida como *bronze-alumínio* (ou *bronze de alumínio*). É um tipo de bronze no qual o alumínio é o principal elemento de liga, em que o teor mássico de até 5% faz com que a liga apresente uma estrutura monofásica que, em termos de propriedades, possua uma combinação de elevada resistência mecânica e à corrosão. Ressalta-se que esses tipos de ligas precisam estar com suas tensões residuais aliviadas; caso contrário, a corrosão sob tensão ocorre de forma rápida quando expostas a meios agressivos.

Outros elementos também podem ser considerados na composição de ligas cobre-alumínio, como o níquel, que eleva a resistência mecânica e à corrosão. Em função dessa adição, a liga passa a ser classificada como *bronze-alumínio-níquel* (NAB, do inglês *Nickel Aluminium Bronze*).

A liga de cobre com silício é conhecida como *bronze-silício* (ou *bronze de silício*). A adição de silício ao cobre propicia elevada soldabilidade e excelente resistência à corrosão por ácidos. As ligas trabalháveis (dúcteis) possuem no máximo 3% de silício e podem conter em torno de 1% de manganês, em massa. As ligas para fundição apresentam 4% a 5% de silício, em massa, e pequenos teores de zinco, ferro e manganês.

Como elemento de liga em importantes materiais de engenharia, o cobre diminui a resistência à corrosão nas ligas de alumínio, porém possibilita o ganho de resistência mecânica e dureza por meio de endurecimento por precipitação. Em relação aos aços, a inserção de cobre destaca-se por aumentar a resistência à corrosão marinha, além de melhorar um pouco a resistência mecânica.

REFERÊNCIAS

ASHBY, M. F. **Materias**: engenharia, ciência, processamento e projeto. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ASTM G3. **Standard recommended practice for conventions applicable to electrochemical measurements in corrosion testing**. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ASTM G15. **Standard recommended definitions of terms relating to corrosion and corrosion testing**. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

ASTM G59. **Standard recommended practice for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements**. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ASTM G82. **Standard guide for development and use of a galvanic series for predicting galvanic corrosion performance**. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ASTM G102. **Standard recommended practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements**. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

ASTM G106. **Standard recommended practice for verification of algorithm and equipment for electrochemical impedance measurements.** West Conshohocken: ASTM International, 2015.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais:** uma abordagem integrada. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

FERRANTE, M.; WALTER, Y. **A materialização da ideia:** noções de materiais para design de produto. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GENTIL, V. **Corrosão.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura** (v. 1). 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura** (v. 2). 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

LOBO, F.G. Influência das variáveis térmicas de solidificação sobre a microestrutura e propriedades da liga Cu-24%Zn-6%Al-4%Mn-3%Fe. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do ABC, Grande ABC (SP), 2023.

OSÓRIO, W. R. R. **Análise da influência de parâmetros estruturais da solidificação de metais e ligas na resistência à corrosão.** (Tese de Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

RICHARDSON, I. **Guide to nickel aluminum bronze for engineers** (v. 222). Birmingham, MI: Copper Development Association, 2010.

ROMANN, T. **Corrosion of copper.** Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Corrosion_of_copper.jpg. Acesso em: 21 nov. 2023.

SANTOS, G. A. **Correlação entre microestrutura, resistência mecânica e resistência à corrosão da liga ZA27.** (Dissertação de Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

SANTOS, G. A. **Tecnologia dos materiais metálicos:** propriedades, estruturas e processos de obtenção. São Paulo: Érica, 2015.

SANTOS, G. A. **Tecnologias mecânicas:** materiais, processos e manufatura avançada. São Paulo: Érica, 2020.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais.** 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais.** 5. ed. São Paulo: Mc-Graw Hill, 2012.

ZURLO, M. N. **Influência da microestrutura na resistência à corrosão da liga Al-3%Cu-1%Li.** (Dissertação de Mestrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2016.