

Corrosão galvânica (bimetálica)

A corrosão galvânica (bimetálica) pode ocorrer quando metais diferentes estão em contato num eletrólito comum (p. ex.: chuva, condensação, etc.). Se a corrente elétrica flui entre os dois, o metal menos nobre (o anodo) corroer a uma taxa mais rápida do que se os metais não estivessem em contato.

A taxa de corrosão depende também das áreas relativa ao contato dos metais, a temperatura e a composição do eletrólito. Em particular, quanto maior a área do catodo em relação ao anodo, maior é a taxa de ataque. As proporções desfavoráveis de áreas ocorrem provavelmente com os fixadores e as juntas. Deveria ser evitado os parafusos de aço carbono nos componentes de aço inoxidável devido a proporção da área do aço inoxidável para o aço carbono que é grande e os parafusos estarão sujeitos à ataque agressivo. Inversamente a taxa de ataque de um componente de aço carbono por um parafuso de aço inoxidável é muito menor.

É normalmente útil extrair de uma experiência anterior em situações similares porque metais diferentes podem frequentemente ser unido de forma segura e sob condições de condensação ocasional ou umidade com resultados não adversos principalmente quando condutividade do eletrólito é baixa.

A previsão desses efeitos é difícil porque a taxa de corrosão é determinada por um número de questões complexas. O uso de tabelas de potencial ignora a presença de filmes de oxido na superfície e os efeitos das proporções da área e deferentes soluções químicas (eletrólito). Entretanto, o uso inadequado destas tabelas pode produzir resultados incorretos. Eles seriam utilizados com cuidado e somente para avaliação inicial.

Os aços inoxidáveis austeníticos normalmente forma o catodo num par bimetálico e então não sofre corrosão. Uma exceção é o par com cobre que deveria ser normalmente evitado exceto em condições propícias. **O contato entre aços inoxidáveis austeníticos e zinco ou alumínio pode resultar em alguma corrosão adicional dos dois últimos metais. Isso é pouco provável que seja significativo estruturalmente, mas o resultado em forma de pó branco/cinza pode ser considerado de má aparência.**

A corrosão galvânica (bimetálica) pode ser evitada pela exclusão da água em detalhe (por ex. pintando ou drenando sobre a junta do conjunto) ou isolando os metais um do outro (por ex. pela pintura das superfícies do conjunto dos metais deferentes). O isolamento em torno das conexões fixadas pode ser conseguido através de gaxetas de plástico não condutor ou borracha e arruelas e buchas de nylon e teflon. Este método é uma particularidade do tempo consumido para efetuar no local e não é possível estipular o nível necessário da inspeção do local para verificar que todas as arruelas e buchas foram montados corretamente.

O comportamento geral dos metais em contato bimetálico em ambientes rural, urbano, industrial e litorâneo é totalmente documentando no PD 6484 "Comentário sobre a corrosão nos contatos bimetálicos e seu alívio" (BSI).

Riscos de corrosão do alumínio em contato com aço inoxidável

De acordo com a tabela de nobreza dos materiais, o alumínio e o aço inoxidável, juntos mostram o risco de corrosão galvânica. Com essa combinação a influência da área superficial relativa na corrosão é importante.

Uma grande área do catodo com relação ao anodo acelera a corrosão anódica. Embora o alumínio sendo anodico com relação ao aço inoxidável, grandes áreas superficiais relativa do alumínio comparado ao aço inoxidável pode ser aceitável dependendo das condições do local.

Os fixadores de aço inoxidável em chapas grossas ou finas de alumínio são considerados normalmente seguros, enquanto que os rebites ou parafusos de alumínio prendendo as peças de aço inoxidável é uma combinação inadequada, assim há o risco prático de corrosão.

Um exemplo de uso seguro do aço inoxidável junto com o alumínio é onde os fixadores e parafusos de aço inoxidável são usados para prender a pista ou parapeitos de ponte de alumínio.

Mesmo sem nenhum isolamento entre os metais, haverá pouco risco de corrosão. Em contraste, num ambiente marinho, uma severa corrosão por pite localizado nos pisos de alumínio tem sido observada, onde parafusos de aço inoxidável foram usados para fixar os pisos no local.

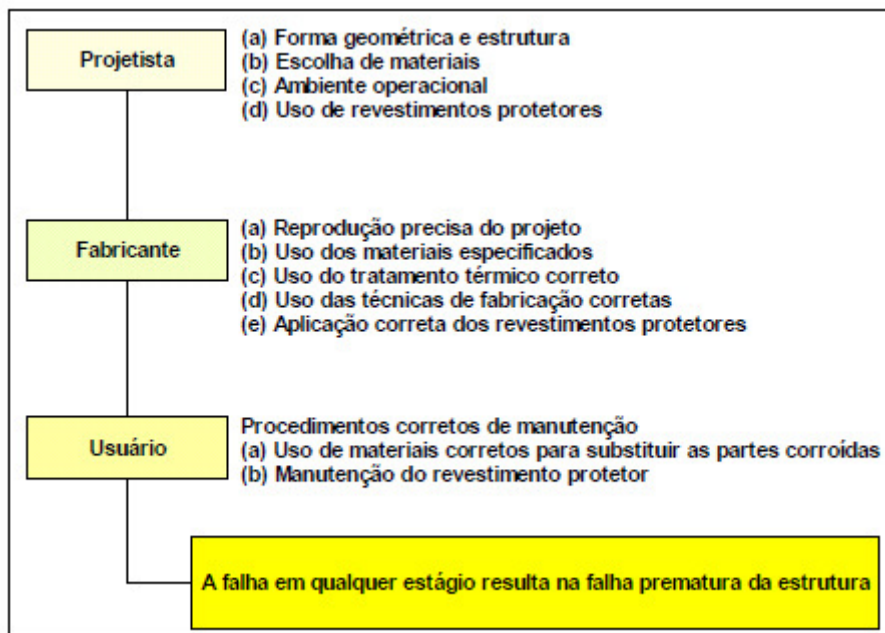
Na escada de mão, entretanto, os parafusos com arruelas isoladas adequadamente não mostra nenhum pite circundante ao alumínio. Isso ilustra o efeito benéfico do rompimento da corrosão galvânica pelo isolamento dos dois metais diferentes em casos especiais.

Princípios básicos do controle da corrosão na etapa de projeto

Introdução

Corrosão pode ser definida como sendo a degradação de um metal através da reação com o ambiente que o circunda.

Existem três estágios importantes na vida de um componente: projeto, construção e utilização. O controle da corrosão desempenha um papel importante em cada um destes estágios:



A falha de qualquer um destes aspectos do controle da corrosão resultará, possivelmente, na falha prematura da estrutura.

O controle da corrosão pode ser feito de vários modos, mas os mais importantes são:

- Alteração do projeto;
- Modificação do ambiente;
- Aplicação de revestimentos de barreira;
- Seleção de materiais;
- Proteção anódica ou catódica.

Este artigo técnico tratará somente de ideias e conceitos gerais do controle da corrosão através da alteração de projeto.

1 – Evite o contato elétrico entre metais e ligas diferentes

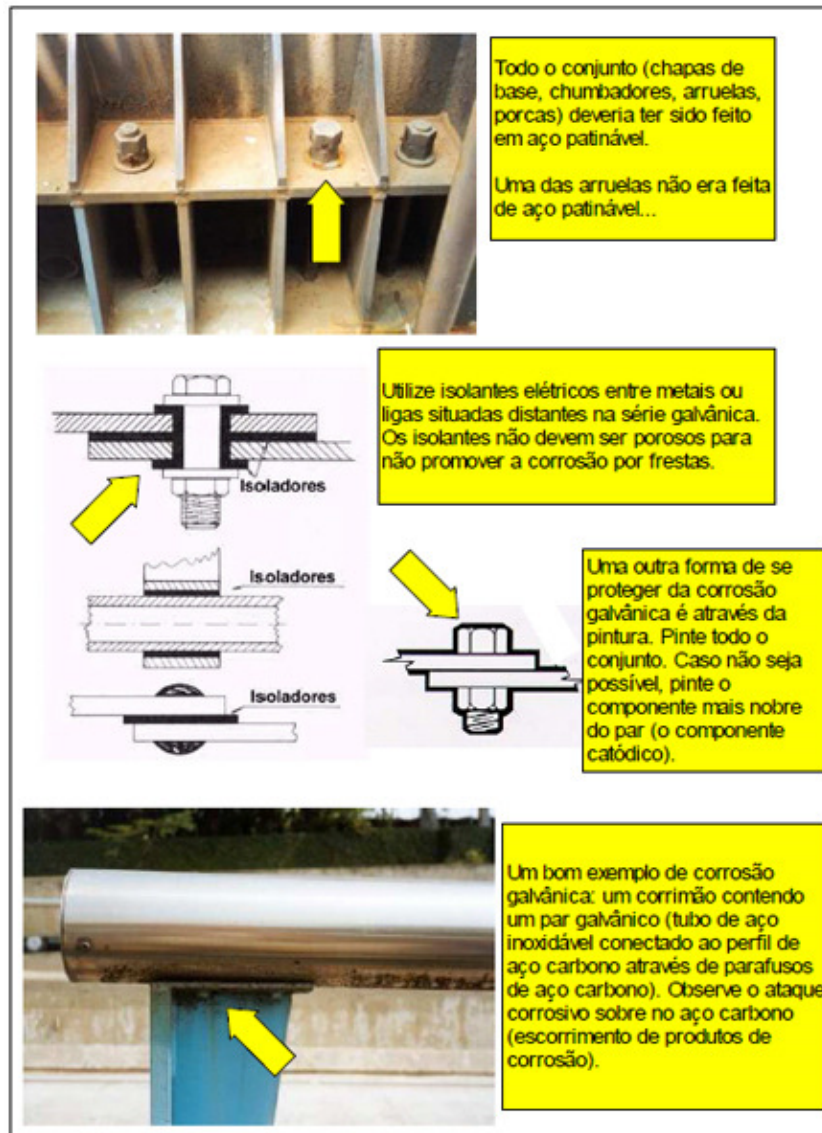
Evite todos os pares bimetálicos possíveis. Não é verdadeiro dizer que a junção de metais distantes na série galvânica provocará problemas de corrosão. Existem inúmeros exemplos de metais ou ligas conectados eletricamente que nunca apresentaram problemas. A corrosão só acontecerá se uma cela galvânica for formada, isto é, se houver dois metais ou ligas situados distantes na série galvânica, conectados eletricamente e imersos em um mesmo eletrólito.

Os efeitos galvânicos acontecem quando a diferença de potencial medida (com um multímetro, p.ex.) entre os dois metais ou ligas imersos no mesmo eletrólito particular supera os 0,05 V.

O meio mais comum de se prevenir da corrosão galvânica é intercalar, entre os dois metais ou ligas, um isolante elétrico. Dentre os muitos compostos orgânicos existentes no mercado alguns resistem às altas pressões de contato exigidas em muitas situações. É importante ressaltar que o material isolante não deve ser poroso, pois ele poderia absorver água e propiciar a formação da corrosão por frestas.

A utilização de juntas coladas auxilia em muito a prevenção da corrosão galvânica, impedindo o ingresso de eletrólitos. Algumas vezes é conveniente introduzir uma peça intermediária, que pode ser facilmente substituída ou então que tenha um potencial intermediário. Um exemplo desta última situação é o do uso de arruelas de zinco entre parafusos de aço conectando chapas de alumínio.

Outra solução possível é a utilização de pintura. Recomenda-se pintar os componentes mais nobres e os menos nobres. Caso não se possa pintar todo o conjunto, recomenda-se pintar o membro mais nobre do par galvânico (membro catódico); a pintura do membro menos nobre (anódico) pode agravar a situação, pois ela poderá levar ao intenso ataque por pites nos poros do revestimento.



2 – Evitar celas de aeração diferencial

A corrosão bimetálica é bastante comum e destrutiva, mas celas de aeração diferencial causadas por diferenças de oxigenação do eletrólito são ainda mais comumente observadas, e costumam causar estragos ainda maiores.



Uma cela de aeração diferencial pode ser desenvolvida em qualquer situação onde a água estiver em contato com uma superfície. Assim, todo cuidado deve ser tomado para se prevenir do ingresso da água em áreas onde ela possa ficar retida por longos períodos. Frestas potenciais devem ser preenchidas com selantes (epoxídicos, poliuretânicos ou à base de silicone); os componentes devem, costumeiramente, possuir furos de drenagem. Permita a ventilação de todo conjunto, para que a água possa evaporar.

Os exemplos de celas de aeração diferencial são muitos:

Frestas

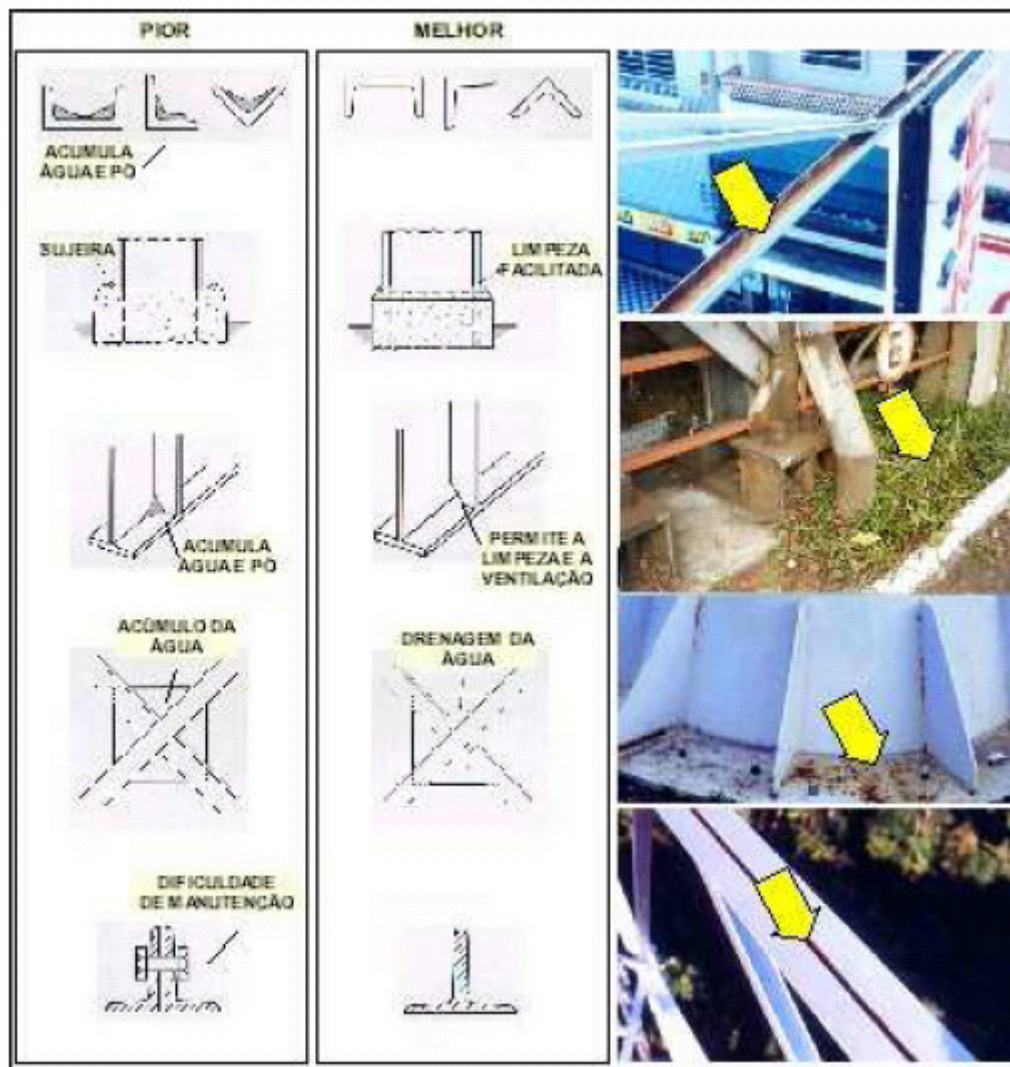
Qualquer ponto onde duas superfícies metálicas são separadas por uma pequena distância é uma cela de corrosão em potencial. A umidade entra pela fresta, em muitos casos, por ação capilar. Onde o líquido está em contato com o ar, o oxigênio consumido no processo de corrosão é rapidamente repostado, mas, no fundo da fresta, a água estará empobrecida em oxigênio. O oxigênio do exterior deve se difundir através do eletrólito para atingir o fundo da fresta. Isso costuma ser muito dificultado pelas condições de estagnação do líquido e pela existência de produtos de corrosão que dificultam ou mesmo impedem o deslocamento iônico. Assim, o fundo da fresta é o local onde a corrosão vai se processar.

Frestas são formadas em muitas situações, como por exemplo, atrás de pontos de solda descontínuos, em juntas parafusadas ou rebitadas ou mesmo em chapas sobrepostas.

Sujeiras Depositadas

Sujeiras que absorvem ou mantêm água (ou lama), produtos de corrosão, folhas, tecidos e papel, promovem a formação de pilhas de aeração diferencial.

3 - Promover a drenagem e a ventilação



Quando a chuva ou o orvalho umedecem uma estrutura metálica, pontos de ferrugem serão observados após a evaporação da água. Cada gota age como uma cela de aeração diferencial, mas, se a superfície tiver a oportunidade de secar (isto é, se existir ventilação adequada), a corrosão será limitada.

Problemas sérios podem ser observados nas partes inferiores das estruturas, onde a ventilação é menos eficiente (a região é protegida das correntes de ar).

4 – Evitar o uso de materiais absorventes (feltro, amianto, tecido) em contato com a superfície metálica

Materiais porosos e absorventes (como por exemplo, lã de rocha, não tecidos, feltro, etc.) têm sido muito utilizados como isolantes térmicos, isolantes acústicos, etc.. Estes materiais podem absorver água como uma "esponja", possibilitando a ocorrência de celas de aeração diferencial na interface material absorvente/metal.

Os materiais absorventes de água devem ser evitados em todas as situações em que a umidade relativa do ambiente exceda (costumeiramente) os 60%.



Autor:

Fabio Domingos Pannoni, M.Sc., Ph.D.1

Corrosão do Alumínio

A maioria das ligas de alumínio apresenta boa resistência à corrosão em atmosferas naturais, água fresca, água do mar, muitos solos e substâncias químicas e à maioria dos alimentos, sendo que recipientes com paredes finas de alumínio são capazes de resistir à perfuração. Deve ser feita uma clara distinção entre durabilidade e estética. Uma superfície de alumínio pode não ser atraente devido à aspereza causada pela presença de pites de corrosão localizada, ou mesmo tornar-se fosca ou escura devido à retenção de sujeira, mas este ataque superficial suave não apresenta nenhum efeito em termos de durabilidade do produto. Este texto aborda primordialmente a corrosão de ligas de alumínio, embora contenha alguma informação sobre corrosão de ligas de alumínio fundidas, sobre as quais pouca informação está disponível na literatura mundial. Provavelmente devido ao fato de que nas peças fundidas, por serem mais espessas a corrosão não é um problema tão sério como nas finas peças trabalhadas. Além disso, a estética não é tão importante para peças fundidas. A composição química e o tratamento térmico, ou termomecânico, influem muito no comportamento das ligas de alumínio em termos de corrosão. Por outro lado, diferenças de prática de fundição pouco influem nesse comportamento.

Camada de Óxido Superficial no Alumínio

De acordo com a termodinâmica o alumínio deveria ser um metal reativo, com baixa resistência à corrosão. A resistência à corrosão do alumínio em muitos ambientes depende da presença de um filme fino, compacto e aderente de óxido na superfície. Sempre que uma nova superfície de alumínio é criada, e exposta tanto ao ar quanto à água, forma-se um filme superficial de óxido de alumínio (Al_2O_3), o qual cresce rapidamente. A espessura normal desse tipo de filme é da ordem de 5 nanômetros (50 Angstrom). A espessura desse filme protetor cresce muito mais rapidamente na água do que no ar, formando-se filmes muito mais espessos em ausência de oxigênio.

O óxido de alumínio se dissolve em muitas substâncias químicas, principalmente em ácidos fortes e álcalis. Quando o filme é removido, o metal se corrói rapidamente por dissolução uniforme. De um modo geral, o filme de óxido é estável numa faixa de pH de 4,0 a 9,0, porém há exceções, como, por exemplo, a estabilidade no ácido nítrico concentrado (pH 1,0) e em hidróxido de amônia concentrado (pH 13,0).

Complexidade do Processo de Corrosão

A definição de corrosão envolve tanto o ambiente quanto o metal, então a resistência à corrosão de uma liga de alumínio depende tanto do ambiente quanto da liga. Variáveis tanto químicas quanto físicas do ambiente afetam a corrosão. A influência química do ambiente depende da sua composição e da presença de impurezas, tais como íons de metais pesados. As variáveis físicas são a temperatura, o grau de movimento e agitação, e a pressão. Outra variável física importante que pode causar corrosão no alumínio é a presença de correntes elétricas (contínuas ou alternadas).

As variáveis associadas à liga que afetam a corrosão são a composição química e o processo de fabricação. Por outro lado, estes fatores determinam a microestrutura, a qual determina se ocorre ou não a corrosão localizada e o tipo de ataque. O projeto de uma estrutura de alumínio também apresenta grande influência no seu comportamento em relação à corrosão. Outros fatores importantes no mesmo sentido são o projeto de juntas e a presença de outros metais.

Devido ao grande número de variáveis que influenciam a corrosão, a adequação do alumínio, ou liga de alumínio, a uma dada aplicação não pode ser definida somente em relação a um tipo de ambiente ou produto. É necessário um conhecimento completo quanto à presença de impurezas, às condições de operação, ao projeto de uma determinada peça ou equipamento, e à microestrutura da liga. É muito valiosa qualquer experiência anterior quanto a aplicações bem sucedidas em condições de serviço.

Comportamento Geral em Corrosão

Corrosividade Relativa de Atmosferas Naturais – Atmosferas podem ser classificadas como rurais, industriais, marinhas, ou industriais-marinhas, embora estes sejam apenas tipos genéricos, havendo amplas variações de corrosividade de qualquer tipo. Com base em ensaios atmosféricos no alumínio realizados em várias localidades do mundo já foram determinadas taxas de corrosão (perda em massa) da ordem de 0,03 a 4,1 micrômetros por ano, ou seja, uma variação de 160 para 1. A corrosividade relativa de uma atmosfera depende muito do metal que está sendo analisado, assim como do local em que a peça metálica está instalada. Além disso, a corrosividade das atmosferas varia de uma liga de alumínio para outra. A dispersão dos resultados é maior no caso de ligas com menor resistência à corrosão. De um modo geral, ligas do sistema Al-Cu (série AA 2XXX) apresentam menor

resistência à corrosão do que ligas do sistema Al-Mn (AA 3XXX), que por sua vez são menos resistentes à corrosão do que o alumínio comercialmente puro.

A corrosividade de uma atmosfera marinha num determinado local depende de alguns fatores, como a quantidade de sal presente dissolvido na atmosfera neste local, o período de umidade à qual está submetida a superfície metálica, e a temperatura. A extensão da atuação dos sais dissolvidos na atmosfera depende da direção, da velocidade e da frequência do vento, da topografia da costa e da maré do local de onde o vento sopra. Em todos os locais, o teor de sal dissolvido na atmosfera diminui com o aumento da distância do mar, e na maioria dos casos seu efeito é desprezível a poucos quilômetros da costa.

Efeito das Intempéries na Superfície de Alumínio

Ligas de alumínio se corroem, quando expostas ao tempo, por um suave enrugamento da superfície como resultado da formação de pites pouco profundo. Não ocorre diminuição uniforme da espessura do material. Assim, a máxima profundidade de um pite num determinado instante é uma medida mais significativa da extensão da corrosão do que a perda de massa. Entretanto, a perda de massa é uma medida do enrugamento.

Taxa de Corrosão Atmosférica

No início do processo de corrosão, o aumento da taxa de corrosão com o tempo depende da corrosividade numa dada atmosfera, independentemente do tipo de medição, seja perda de massa, profundidade de pite ou perda de resistência mecânica. Após tempo prolongado, da ordem de 6 meses a 2 anos, a taxa atinge um patamar onde praticamente se mantém, com pouca variação. Em atmosferas rurais a perda de massa é inferior a 0,03 micrometros por ano. Em muitas atmosferas industriais a taxa de corrosão fica na faixa de 0,8 a 2,8 micrometros por ano. Em algumas poucas atmosferas poluídas encontram-se taxas mais altas, da ordem de 13 micrometros por ano, com base na profundidade de pite. Ligas Al-Mg fundidas típicas, como 514.0 e 520.0-T4, sofrem perda de massa por corrosão praticamente desprezível em todos os tipos de atmosferas, mas a liga 520.0-T4 sofre trincamento por corrosão sob tensão em ambientes marinhos, especialmente após envelhecimento. Em atmosfera urbana a perda é menor.

Ligas Al-Si fundidas, tais como B443.0, 356.0-T6 e 413.0 apresentam boa resistência à corrosão atmosférica. Entretanto, ligas Al-Cu fundidas como 295.0-T6 e 333.0-F necessitam de proteção superficial em ambientes marinhos e em atmosferas industriais, pois caso contrário poderia haver até mesmo a formação de pites de corrosão localizada, com profundidade de até 508 micrometros. Ligas Al-Si-Cu, tais como 355.0-T6 e 380.0-F também necessitam de proteção contra condições extremamente corrosivas, devido aos seus elevados teores de cobre.

Algumas ligas fundidas Al-Zn-Mg sofrem corrosão sob tensão (trincamento) em atmosferas comuns. Algumas tampas fabricadas com liga A712.0 (contendo 7,5 % Zn e 0,5 % Mg), as quais foram submetidas a tensões consideráveis, falharam por trincamento corrosão sob tensão. Entretanto, já foi demonstrado que uma liga, contendo 6,5 % Zn, 0,7 % Mg e 0,4 % Cu, apresentou muito melhor resistência ao trincamento por corrosão sob tensão. A redução do teor de zinco, de 6,5 para 6,0 %, causou apenas uma pequena queda na resistência mecânica, ao passo que triplicou a vida útil do material em condições propícias ao trincamento por corrosão sob tensão.

Influência do Tipo de Atmosfera

Rural – Em atmosferas rurais a corrosão da chapa de alumínio quase não é detectada. Ao longo do tempo a superfície deste material apresenta uma coloração cinzenta.

Marinha – Em atmosferas marinhas a superfície originalmente brilhante torna-se fosca, com uma coloração cinzenta que não é típica do alumínio. O alumínio comercialmente puro e as ligas Al-Mn, Al-Mg e Al-Mg-Si apresentam boa resistência à corrosão, sendo que muitas destas são usadas em estruturas de embarcações. Por outro lado, as ligas Al-Cu e Al-Zn-Mg não apresentam boa resistência à corrosão causada por atmosferas marinhas e, portanto, devem ser protegidas pela aplicação de tintas e clades (“cladding”).

Industrial – Em atmosferas industriais a superfície de alumínio escurece rapidamente e pode se tornar completamente negra em apenas 1 ano. Superfícies verticais descolorem numa taxa mais lenta do que superfícies inclinadas. Superfícies protegidas por coberturas e não lavadas pela chuva descolorem mais rapidamente. Após tempo prolongado (25 a 50 anos), o enrugamento superficial é acentuado e também ocorre perda de resistência mecânica de chapas finas (espessura da ordem de 0,8 mm). Uma chapa de alumínio comercialmente puro exposta num edifício de uma grande cidade sofre corrosão por pites cuja profundidade pode

chegar a 152 micra em 52 anos. Em ambientes ainda mais agressivos, como túneis e estações por onde passam trens a vapor, a taxa de corrosão é considerável.

As ligas de alumínio apresentam boa resistência à corrosão à maioria dos tipos de água fresca. Se ocorrer corrosão, esta se manifesta pela formação de pites, cuja taxa segue uma tendência decrescente.

Influência da Composição da Água – Águas “moles” (com baixo teor de sais dissolvidos) são as que apresentam menor tendência de corrosão no alumínio, e a menor taxa de penetração, ao contrário do seu efeito no cobre, no aço escurecido e no aço galvanizado. Águas moles, especialmente as ácidas, tendem a dissolver o cobre, o que causa corrosão por deposição no alumínio. A água destilada e deionizada e o vapor condensado são processadas em dispositivos fabricados com alumínio.

Os principais componentes das águas naturais que causam corrosão por pite no alumínio são o cobre, bicarbonatos, cloretos, sulfatos e oxigênio. Águas mais duras (com maior teor de bicarbonatos dissolvidos) apresentam maior tendência à formação de pites.

Análise Estatística por Valores Extremos - No que se refere aos dados obtidos sobre pites (profundidade e etc), o tratamento estatístico, principalmente por método de valores extremos, permite uma análise mais confiável, com a eliminação de dados espúrios, como os resultantes da formação de pites por motivos raros e não típicos, como, por exemplo, devido a uma incrustação de cobre, o chamado “ponto fora da curva” numa análise estatística.

Taxa de Formação de Pites – A formação de pites no alumínio, causada pela presença de água fresca, segue uma expressão cúbica, na qual a profundidade é expressa por uma função cúbica inversa do tempo: $d = K(t)^{1/3}$. Como consequência dessa expressão, é possível dizer que ao dobrar a espessura da chapa ou parede, aumenta-se em 8 vezes o tempo no qual ocorre a perfuração por corrosão localizada.

Estruturas fabricadas com ligas de alumínio são freqüentemente usadas em água do mar. Barcos, lanchas, cabines de cruzadores, e boa parte da estrutura de navios tem sido construída com esse tipo de material desde 1930. Hoje em dia se constrói barcos com casco de alumínio, os quais podem ter até 61 metros de comprimento. Os cascos são pintados para evitar a formação de crostas, que poderiam surgir devido ao ambiente marinho, ao passo que as superestruturas são pintadas somente por motivos estéticos. Superestruturas navais pintadas fabricadas com alumínio necessitam de retoques com freqüência duas vezes menor que as mesmas superestruturas fabricadas com aço. E devido a um contraste marcante, a superestrutura de alumínio pintada freqüentemente induz à necessidade de fazer retoques na pintura da parte fabricada em aço, com uma freqüência maior do que seria necessário se o alumínio não fosse usado.

Taxas de Formação de Pites – Se a corrosão acontecer, ela se manifesta pela formação de pites e segue função cúbica inversa semelhante à apresentada para água fresca. A exceção a esta regra ocorre quando existe clade, pois neste caso a profundidade máxima do pite não excede a espessura do clade, até que uma extensa área de clade seja removida.

As ligas de alumínio-magnésio trabalhadas são as mais resistentes à ação corrosiva da água do mar. Raramente são encontrados pites com profundidade de 1270 micra, mesmo após 10 anos de imersão neste meio. Já as ligas alumínio-magnésio silício são menos resistentes à corrosão causada por água do mar, embora partes de estruturas fabricadas com estas ligas possam ser usadas na água do mar sem proteção. Estas ligas também sofrem corrosão por pites e corrosão intergranular até certo ponto. Por outro lado, as ligas de alta resistência mecânica, como alumínio-cobre e alumínio-zinco-magnésio, são menos resistentes à ação corrosiva da água do mar e não devem ser imersas em água do mar, a não ser protegidas por clades.

Há pouca informação sobre corrosão em ligas de alumínio causada por solos, porém o pouco que já foi relatado indica que com exceção das ligas Al-Cu e Al-Zn-Mg, as demais ligas de alumínio são resistentes à ação corrosiva da maioria dos tipos de solos. Não ocorre redução de espessura de chapas fabricadas com estas ligas, a não ser que o solo esteja contaminado com substâncias químicas muito corrosivas. E se a corrosão ocorrer, se manifesta pela formação de pites, e a taxa de penetração cai com o tempo. Ainda não foi estabelecida uma relação entre profundidade de pite e tempo, mas tudo indica que para os solos em geral também vale a mesma função cúbica inversa descrita para água fresca e água do mar.

O alumínio é resistente à ação corrosiva da maioria dos alimentos, e por este motivo é muito utilizado na fabricação de embalagens de comida e bebida, além de ser utilizado também na fabricação de utensílios domésticos. Pipocas e batatas podem causar manchas de escurecimento superficial em painéis de alumínio, mas que podem ser removidas por meios do uso de agentes abrasivos comuns. O ruibarbo, que contém ácido oxálico, apresenta efeito de abrilhantamento nos utensílios de alumínio e dissolve filmes anódicos que estejam presentes. Recipientes de alumínio são usados para muitos alimentos, geralmente com um filme superficial protetor interno

para evitar o surgimento de pites. Além de embalagens para alimentos, o alumínio também é muito usado em embalagens para bebidas.

O alumínio é completamente resistente à ação corrosiva de muitas substâncias químicas, enquanto em outras se dissolve uniformemente e rapidamente. Em algumas substâncias químicas, como o metanol ou o fenol, um traço de água (0,1 %) evita a corrosão, principalmente em altas temperaturas. Em outras, com, por exemplo, no SO₂ líquido, um traço de água provoca corrosão. E a conjugação de substâncias diferentes, que isoladamente seriam inofensivas, pode causar corrosão no alumínio. Por exemplo, o ácido acético glacial é inócuo ao alumínio, mas com traços de mercúrio em dissolução pode causar corrosão por deposição no alumínio. A temperatura e o grau de agitação também exercem influência no comportamento do alumínio em corrosão causada por estas substâncias. Sempre que for desenvolvida uma nova aplicação importante para o alumínio seu comportamento em corrosão deve ser analisado em laboratório.

Hidrocarbonetos Halogenados

As ligas de alumínio em geral são resistentes à corrosão causada por hidrocarbonetos halogenados puros na maioria das condições, e particularmente à temperatura ambiente. Entretanto, alguns hidrocarbonetos podem produzir uma rápida taxa de corrosão ou mesmo uma reação violenta no alumínio. Devem ser estabelecidas condições de serviço em segurança antes que o alumínio seja usado em contato com qualquer hidrocarboneto halogenado.

Os hidrocarbonetos halogenados podem ser decompostos por hidrólise se houver presença de água, ou por outros processos, produzindo ácidos minerais, como o ácido clorídrico. Esses ácidos corroem as ligas de alumínio ao destruir a proteção natural conferida pelo filme de óxido protetor. A corrosão das ligas de alumínio por esses ácidos podem promover reações nos próprios hidrocarbonetos, pois os haletos de alumínio formados pela corrosão são catalisadores para reações, como é o caso do AlCl₃. Em alguns casos podem se formar compostos alcalinos de alumínio. Devido à rápida taxa de aquecimento, uma vez iniciadas a corrosão do alumínio e a reação do hidrocarboneto halogenado tendem a se tornar autocatalíticas.

A reatividade das ligas de alumínio com os hidrocarbonetos halogenados geralmente decresce à medida que aumenta a estabilidade química desses hidrocarbonetos, geralmente disponível na literatura sobre termodinâmica. Assim, o alumínio é mais resistente aos hidrocarbonetos halogenados com flúor, seguidos por aqueles que contêm cloro, bromo e iodo em ordem de resistência à corrosão decrescente. O alumínio também é resistente à ação corrosiva de hidrocarbonetos halogenados altamente polimerizados, indicando o alto grau de estabilidade química deste tipo de substância.

O comportamento das ligas de alumínio em contato com misturas de diferentes tipos de hidrocarbonetos halogenados, ou misturas destes hidrocarbonetos com outros compostos orgânicos, não pode ser inferido a partir do comportamento destes materiais com estas substâncias isoladas. Misturas de metanol e tetracloreto de carbono, por exemplo, resultam em rápida corrosão de algumas ligas de alumínio à temperatura ambiente, embora, isoladamente cada uma destas substâncias não apresentem o mesmo efeito.

A resistência das ligas de alumínio à ação corrosiva de hidrocarbonetos halogenados tende a diminuir com o aumento da temperatura. A taxa da corrosão em muitos hidrocarbonetos halogenados líquidos permanece baixa até que o ponto de ebulição seja atingido. Em alguns tipos de hidrocarbonetos, a taxa é baixa ou inexistente mesmo nesta temperatura. Outros fatores que afetam a resistência a esse tipo de corrosão incluem a presença de um inibidor e a pureza do hidrocarboneto halogenado. Aminas ou vários compostos heterocíclicos têm sido usados efetivamente como inibidores em certos casos.

O alumínio finamente dividido, como no caso de pós e partículas finas em geral, não deve ser exposto a um hidrocarboneto halogenado. A possibilidade de ocorrer uma reação violenta, até mesmo uma explosão, aumenta quando o alumínio com elevada área superficial é exposto a um pequeno volume de hidrocarboneto halogenado, ainda mais quando esta operação é realizada sob pressão.

Tubos de alumínio são utilizados para o transporte de substâncias refrigerantes à base de freon. Banhos desengraxantes de tricloroetileno são usados para limpeza de produtos de alumínio trabalhados mecanicamente. Estes banhos são comprovadamente eficientes nesta função, desde que um solvente estabilizado seja utilizado, evitando-se a acumulação de água e de finos de alumínio e descartando-se o banho quando for detectada a presença de ácido.

Materiais de Construção Civil

O alumínio e suas ligas são muito utilizados em edifícios comerciais, na forma de fachadas, portas, janelas e condutores elétricos, assim como em residências privadas na forma de janelas, portas de telas, calhas e outros produtos. O desempenho do alumínio em contato com, ou mesmo encapsulado em, materiais de construção civil, como concreto, argamassa, gesso, cal, tijolos e madeira é importante nessas aplicações.

Ao contrário do que se acredita, as ligas de alumínio não são seriamente corroídas por inserção em longo prazo em concreto à base de cimento portland, argamassa de tijolos padrão, argamassa de tijolos à base de cal e gesso. Ocorre ataque leve e superficial no alumínio quando este entra em contato com estes produtos, mas a não ser que ocorram molhamento e secagem alternados e intermitentes, não ocorre corrosão considerável. Entretanto, o alumínio pode sofrer corrosão quando em contato com concreto contendo cloro e em contato com metal dissimilar, como, por exemplo, o aço da estrutura de reforço.

Materiais absorventes como papel, asbesto, ou madeira não são adequados para receber revestimentos que ficam em contato com o alumínio sob condições nas quais este fica úmido, por causa da condensação da água, proveniente de outra fonte, que tende a corroer o alumínio. Placas de alumínio isoladas com compósitos aderidos são feitas com uma mistura com uma barreira de umidade para evitar que o isolamento fique úmido. Alguns materiais de isolamento, como a magnésia, são alcalinos e assim bastante corrosivos em relação ao alumínio. Oxicloreto de magnésio, material freqüentemente utilizado em pisos de automóveis, trens de metrô e convés de navio, é muito corrosivo ao alumínio e não deve ser usado em contato com este metal, independentemente do tipo de medida preventiva adotada.

Embora poucos tipos de madeira provoquem corrosão por contato com o alumínio, surge risco de corrosão quando o teor de umidade na madeira supera a faixa de 18 a 20 %, uma condição que é atingida quando a umidade do ar ambiente supera 85 %. Se a madeira umedecer em serviço, o alumínio utilizado em contato com esta madeira deve ser protegido por uma membrana impermeável ou por um revestimento betuminoso aplicado por pintura. Outra possibilidade de corrosão é o uso de madeira que esteve em contato com água do mar, absorvendo sais extremamente corrosivos. Algumas substâncias usadas na proteção das madeiras podem ajudar a inibir a corrosão do alumínio pelo contato com a madeira assim protegida. Entretanto, outros tipos de substâncias usadas na proteção da madeira, principalmente as que contêm cobre e, agravam a corrosão do alumínio. Outro agente extremamente agressivo é o mercúrio, que também pode estar presente em algumas substâncias usadas na proteção da madeira.

Tipos de Corrosão

Corrosão Uniforme – Se o filme de óxido for solúvel no ambiente, como, por exemplo, em ácido fosfórico ou hidróxido de sódio, o alumínio se dissolve uniformemente a uma taxa constante. Se ocorrer liberação de calor, como no caso da dissolução em hidróxido de sódio, a temperatura da solução e a taxa de corrosão aumentam. Dependendo dos íons presentes, assim como de sua concentração e da temperatura, o ataque pode ser superficial ou uma dissolução rápida. O ataque corrosivo uniforme pode ser medido por perda em massa ou por perda de espessura.

Corrosão Localizada – Em ambientes nos quais o filme superficial é insolúvel, a corrosão se localiza em pontos fracos do filme de óxido e assume uma das formas descritas a seguir. A corrosão localizada ocorre por um mecanismo eletroquímico e é causada pela diferença no potencial de corrosão numa célula local formada por diferenças na superfície do metal. A diferença em geral está na camada superficial, por causa da presença de microconstituintes catódicos, que podem ser compostos intermetálicos insolúveis ou elementos simples. Os mais comuns são o CuAl_2 , o FeAl_3 e o silício. Entretanto, a diferença pode estar na superfície por causa de diferenças locais no ambiente. Um exemplo comum deste caso é a célula de aeração diferenciada. Outro exemplo é a presença de partículas de metal pesado depositadas na superfície. Menos freqüente é a presença de impurezas retidas na superfície como ferro e cobre. Existem vários outros tipos de causa de formação de célula local. A severidade da célula local de corrosão tende a aumentar com a condutividade do ambiente.

Outra causa eletroquímica da corrosão é o resultado de uma corrente elétrica que deixa a superfície do alumínio para entrar no ambiente. O único tipo de corrosão localizada que não está associada a um mecanismo eletroquímico é a corrosão por atrito, que é um tipo de oxidação seca. Em quase todos os casos de corrosão localizada, o processo envolve uma reação com a água: $2\text{Al} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2$. O produto da corrosão é quase sempre o tri-hidrato de óxido de alumínio (Bayerita). A corrosão localizada em geral não corre em água extremamente pura à temperatura ambiente ou em ausência de oxigênio, mas pode ocorrer em soluções mais condutivas por causa da presença de íons como o cloreto ou o sulfato. Um exame do produto da corrosão permite

identificar o íon agressivo e assim a causa da corrosão. A corrosão localizada frequentemente pode ser controlada ou mesmo evitada, como será abordado a seguir.

Corrosão por Pites – O pite consiste na remoção de metal em determinados sítios localizados da superfície do metal, resultando no desenvolvimento de cavidades. Para que ocorra a formação de pites, deve estar presente um eletrólito, que pode ser um líquido volumoso, um sólido úmido, um filme de umidade condensada, ou gotas de água depositadas sobre uma superfície. O oxigênio também deve estar presente, para que haja a formação do pite.

Enquanto a forma dos pites no alumínio pode variar de depressões rasas em forma de pires até furos cilíndricos, a abertura é aproximadamente redonda, e a cavidade do pite é ligeiramente hemisférica. Isso diferencia o pite da corrosão intergranular, cujo ataque é confinado a “túneis” subsuperficiais ao longo de contornos de grãos, que são visíveis somente em análise metalográfica de seções retas. A corrosão intergranular pode ocorrer conjuntamente com a formação de pites, e neste caso as fissuras intergranulares avançam no metal lateralmente e para o seu interior a partir da cavidade do pite. A causa primária da formação de pites no alumínio é a presença de células locais na superfície metálica, como descrita anteriormente.

Nas etapas iniciais do crescimento do pite, a reação é autocatalítica. A iniciação ocorre pela ruptura de um ponto na superfície do filme de óxido adjacente à partícula catódica. Se um íon de cobre está presente, se deposita no sítio catódico, aumentando o potencial motriz da reação. À medida que a cavidade do pite (anodo) se desenvolve, o ambiente torna-se ácido (pH 3 a 4), e o ambiente em torno da superfície catódica torna-se ligeiramente alcalino. Essas mudanças locais no ambiente aumentam o potencial motriz da célula local e também a corrente do pite. Quando se atinge o estado estacionário, a corrente do pite mantém-se constante e é controlada pelo catodo externo, cuja área é influenciada pela condutividade do eletrólito. Pites próximos interagem ao competir pela área catódica disponível. Geralmente, quanto maior o número de pites, mais raso será o pite mais profundo. Em pites profundos que ficaram revestidos com produtos de corrosão, a função do catodo externo é provavelmente menos importante, e o pH do líquido presente na cavidade é provavelmente mais importante.

A composição do eletrólito tem grande influência na iniciação e na taxa de crescimento dos pites no alumínio. Entretanto, a influência dos muitos ânions e cátions é complexa e ainda não está completamente compreendida. Porém, em todos os casos a taxa de penetração diminui consideravelmente com o tempo. O alumínio de alta pureza duplamente refinado (AA 1099) apresenta excelente resistência à formação de pites e neste aspecto é muito superior às ligas comerciais. A liga 3003, fabricada a partir de matéria-prima de alta pureza e destinada à produção de utensílios de cozinha, é bastante resistente à formação de pites. Entre as ligas comerciais, o grupo das ligas alumínio-magnésio (série 5XXX) é o que apresenta a menor possibilidade de formação e penetração de pites. Com teor de cobre muito baixo (inferior a 0,04 %), as ligas alumínio manganês (3XXX) mostram comportamento comparável, porém quando o teor de cobre atinge 0,15 %, a formação de pites é mais acentuada, especialmente em água do mar. No alumínio comercialmente puro (1XXX), a resistência à formação de pites aumenta com o grau de pureza e é melhor quando os teores de ferro e cobre são mais baixos. Nas ligas alumínio-magnésio-silício (6XXX), ocorrem ao mesmo tempo a formação de pites e a corrosão intergranular. Por exemplo, a liga 6351 pode apresentar suave formação de bolhas em atmosferas industriais severas e na água do mar. Na forma de chapas, as ligas alumínio-cobre (2XXX) e alumínio-zinco-magnésio (7XXX) são revestidas por clades como forma de proteção contra a formação de pites.

Corrosão por Frestas – Se um eletrólito está presente numa fresta formada entre duas superfícies de alumínio, ou entre uma superfície de alumínio e um material não metálico, ocorre corrosão localizada na forma de pites ou mesmo de um remendo. O teor de oxigênio na fresta é consumido pela reação de formação de um filme com a superfície de alumínio, e a corrosão pára por causa porque o fornecimento de oxigênio por difusão para a fresta é lento. Na abertura da fresta, tanto submersa quanto exposta ao ar, há maior quantidade de oxigênio. Isso cria uma célula local: água com oxigênio em contraste com água sem oxigênio, e os potenciais de corrosão são tais que ocorre corrosão localizada na região empobrecida em oxigênio (anodo) imediatamente adjacente à região rica em oxigênio (catodo) próxima à abertura da fresta. Isso pode ser denominado uma célula de concentração ou uma célula de areação diferencial. Uma vez iniciado o ataque corrosivo que leva à formação da fresta, a área do anodo se torna ácida, enquanto a área do catodo se torna alcalina. Essas mudanças favorecem ainda mais a ação da célula local.

Corrosão por Frestas – Se um eletrólito está presente numa fresta formada entre duas superfícies de alumínio, ou entre uma superfície de alumínio e um material não metálico, ocorre corrosão localizada na forma de pites ou mesmo de um remendo. O teor de oxigênio na fresta é consumido pela reação de formação de um filme com a superfície de alumínio, e a corrosão pára por causa porque o fornecimento de oxigênio por difusão para a fresta é lento. Na abertura da fresta, tanto submersa quanto exposta ao ar, há maior quantidade de oxigênio. Isso cria uma célula local: água com oxigênio em contraste com água sem oxigênio, e os potenciais de corrosão são tais que ocorre corrosão localizada na região empobrecida em oxigênio (anodo) imediatamente adjacente à região rica em

oxigênio (catodo) próxima à abertura da fresta. Isso pode ser denominado uma célula de concentração ou uma célula de areação diferencial. Uma vez iniciado o ataque corrosivo que leva à formação da fresta, a área do anodo se torna ácida, enquanto a área do catodo se torna alcalina. Essas mudanças favorecem ainda mais a ação da célula local.

Uma variável importante no contexto da corrosão por frestas é a largura da abertura da fresta, porque este valor determina a facilidade da difusão do oxigênio para a fresta, além de afetar a resistividade do líquido existente dentro da fresta. A corrosão por frestas no alumínio é desprezível em água fresca.

Frestas Submersas – No caso de frestas submersas, outra variável importante é a razão da área superficial ativamente corroída para a área externa efetiva do catodo. A taxa de corrosão por fresta no alumínio aumenta com a diminuição das dimensões da abertura da fresta e com o aumento da área externa do catodo. A corrosão das ligas Al-Cu e Al-Zn-Mg é muito mais rápida do que a das ligas 3XXX (Al-Mn) e 5XXX (Al-Mg) e do alumínio comercialmente puro (1XXX). Novamente a largura da fresta é importante, porque as taxas de corrosão são baixas para frestas com aberturas superiores a 254 micra.

Frestas Atmosféricas – No projeto de estruturas de alumínio para serviço marítimo, não há necessidade de uma margem para obter uma vida útil de 5 anos, com exceção do caso de seções retas inferiores a 1016 micra. Para conseguir vida útil mais prolongada, as superfícies expostas devem ser revestidas com pinturas inibidoras, e, quando possível, a fresta deve ser selada com substância aderente que elimine a umidade. No caso de seções mais espessas não há necessidade de providência semelhante.

Fresta em Águas – Embora seja desprezível em água fresca a corrosão por fresta do alumínio muitas vezes se manifesta como corrosão por pites, embora a taxa dessa reação seja relativamente lenta. A resistência à corrosão por fresta é semelhante à resistência à corrosão por pites no caso do alumínio, e é mais alta no caso de ligas Al-Mg do que no caso de ligas Al-Mg-Si.

Manchas Causadas por Água – O caso mais comum de corrosão por fresta no alumínio ocorre quando água está presente no espaço restrito entre camadas de alumínio em contato estreito, como em pacotes de chapas ou bobinas. Pode ocorrer durante armazenamento ou transporte por causa de proteção inadequada para evitar a entrada de água da chuva, ou por causa de condensação dentro da fresta quando a temperatura da superfície metálica cai abaixo do ponto de orvalho. Manchas irregulares de corrosão são produzidas nas superfícies que estão em contato, podem variar na coloração de cinza a marrom, ou mesmo preto. Em casos de corrosão mais acentuada o produto de corrosão une as suas superfícies tão fortemente que dificulta a separação.

E alguns casos, as manchas apresentam alguns anéis irregulares, como linhas de contornos de mapas. Provavelmente são contornos de poças d'água e várias etapas de evaporação. As manchas inviabilizam o uso das chapas em aplicações nas quais o aspecto visual é importante, embora a corrosão não seja profunda e raramente ocorra perfuração, mesmo em chapas finas. As áreas manchadas não são mais suscetíveis à corrosão subsequente, elas são na verdade mais resistentes porque estão cobertas por um file de óxido relativamente espesso. A ocorrência de manchas causadas por água pode ser evitada mediante cuidados para impedir a entrada de água da chuva e condições de condensação. A temperatura do metal deve ser mantida acima do ponto de orvalho, tanto ao se garantir umidade relativa baixa no local, quanto ao se evitar o resfriamento do metal.

Corrosão Filiforme – É um caso especial de corrosão por fresta que pode ocorrer numa superfície de alumínio sob revestimento orgânico. Assume a forma de filamentos aleatoriamente distribuídos com formato de espiras, e também pode ser conhecida como corrosão vermicular ou em forma de vermes. Os produtos de corrosão formam uma protuberância na superfície do revestimento, como colinas numa planície. As trilhas procedem de um ou mais pontos, onde o revestimento falha. O filme superficial propriamente dito não é envolvido no processo, exceto na função de prover zonas inadequadas com pouca adesão, que formam as frestas nas quais ocorre corrosão, como consequência do acesso da umidade em áreas com acesso restrito de oxigênio. A corrosão filiforme em geral ocorre em ambientes caracterizados por elevada umidade. Pode ser combatida pelo uso de revestimentos, anodização e inibidores à base de cromato aplicados antes da pintura. A quantidade de alumínio consumida pela corrosão em frestas é pequena e significativa apenas em caso de pequenas espessuras ou quando a aparência da superfície é muito importante. Mais sério é o caso de produtos de corrosão em grandes quantidades em espaços confinados, pois sendo muito mais volumosos que o metal a partir do qual são produzidos, podem distorcer mesmo seções com grandes dimensões.

Corrosão Galvânica – A corrosão acelerada de um metal por causa de contato elétrico com um metal mais nobre ou com um condutor não metálico como a grafite em um ambiente condutor é denominada corrosão galvânica. Os exemplos mais comuns de corrosão galvânica nas ligas de alumínio em serviço ocorrem quando estas são soldadas ou ligadas de alguma forma ao aço ou ao cobre e expostas a um ambiente de névoa salina. A liga de alumínio corrói mais rapidamente do que na ausência de contato com o metal dissimilar.

A taxa de ataque corrosivo galvânico depende de alguns fatores: a) diferença de potencial de corrosão entre os dois metais; b) resistência elétrica entre os dois metais; c) condutividade elétrica do eletrólito; d) razão entre as áreas do catodo e do anodo; e) características de polarização dos dois metais. A tabela de potenciais de corrosão apenas diz se o metal pode ou não sofrer corrosão galvânica, mas não prevê a extensão do ataque corrosivo. Por exemplo, a diferença de potenciais entre o alumínio e o aço inoxidável é maior do que entre o alumínio e o cobre, mas na junção alumínio-cobre o ataque corrosivo é mais intenso devido à maior polarização. Além do contato físico, a imersão dos metais dissimilares de algum modo ligados em um mesmo eletrólito também acarreta corrosão galvânica.

A corrosão galvânica do alumínio em geral é suave, exceto em meios muito condutores como água do mar, névoa salina e lamas salgadas. Em água natural não salina e em atmosferas não salinas a corrosão galvânica do alumínio é raramente significativa, embora gotejamento de água a partir de cobre e suas ligas em superfícies de alumínio acarretem considerável ataque corrosivo por pites.

Em ambientes naturais, inclusive em condições salinas, o zinco é anódico em relação ao alumínio e, portanto, se corrói preferencialmente. O magnésio também apresenta efeito semelhante, embora em ambientes marinhos fortemente corrosivos este metal acarrete corrosão catódica do alumínio por causa da condição alcalina existente na superfície do alumínio. O cádmio é neutro em relação ao alumínio e pode ser usado em contato com este metal de forma segura. Os outros metais estruturais são catódicos e provocam corrosão galvânica no alumínio. Entre todos os metais os mais corrosivos quando em contato com o alumínio são o cobre e suas ligas (latão, bronze e cuproníquel) seguidos pelos aços (somente em ambientes salinos). Em ambientes normais e em águas naturais os aços inoxidáveis podem ser utilizados seguramente em contato com o alumínio. O níquel é menos agressivo do que o cobre, apresentando comportamento semelhante ao dos aços inoxidáveis em relação ao alumínio. Em atmosferas marinhas muito agressivas o aço inoxidável provoca corrosão no alumínio. Em água do mar a ação corrosiva depende da razão entre as áreas do catodo e do anodo. Revestimentos eletrolíticos de cromo apresentam o mesmo efeito do aço inoxidável. O chumbo pode ser usado com o alumínio, exceto em atmosferas marinhas muito agressivas. O comportamento galvânico das diversas ligas de alumínio é muito semelhante, não sendo solução eficaz a roca de ligas.

Corrosão por Deposição – Este é um caso especial de corrosão galvânica no qual o ataque se manifesta pela formação de pites. Ocorre quando partículas de um metal mais catódico em suspensão se depositam na superfície de alumínio, formando células galvânicas locais. Os íons agressivos ao alumínio são o cobre, o chumbo, o mercúrio, o níquel e o estanho, comumente conhecidos como metais pesados. O efeito dos metais pesados é ainda maior em soluções ácidas, ao passo que em soluções alcalinas sua solubilidade é muito menor, resultando em efeitos menos severos.

O íon cobre se constitui na causa mais comum desse tipo de corrosão em aplicações do alumínio. O exemplo mais comum é a chuva que incide em telhados de cobre e se deposita em calhas de alumínio, provocando corrosão. Mesmo pequenos teores de cobre, da ordem de 0,05 ppm, podem ser nocivos, dependendo das condições de exposição. Por exemplo, o cobre representa um problema muito maior em soluções areadas de haletos do que em soluções areadas de não haletos.

O íon mercúrio é o mais agressivo ao alumínio, mesmo em traços. Felizmente o mercúrio raramente está presente em águas naturais ou em soluções aquosas comerciais, mas é ocasionalmente encontrado em locais inesperados, como, por exemplo, devido à quebra de um termômetro ou onde o mercúrio retido contaminou uma estrutura.

O mercúrio líquido não molha uma superfície de alumínio, e pode ser manuseado em garrafas anodizadas de alumínio. Entretanto, se a camada de óxido natural da superfície de alumínio é rompida (o que pode ser favorecido pela presença de haletos), o alumínio dissolve-se no mercúrio, formando um amálgama e então a reação corrosiva torna-se catastrófica. O alumínio dissolvido se oxida imediatamente na presença de umidade, e mais alumínio se dissolve gerando um ciclo agressivo com altas taxas de corrosão.

Corrosão Intergranular – É o ataque seletivo da zona dos contornos de grãos sem ataque significativo na matriz (interior dos grãos). O mecanismo é eletroquímico e é resultado da ação de uma célula local nos contornos de grãos. Células são formadas entre microconstituintes de segunda fase e o alumínio que é retirado da solução sólida da qual se formam os microconstituintes. Estes microconstituintes possuem diferentes potenciais de corrosão em relação à solução sólida empobrecida adjacente. Em algumas ligas, como Al-Mg e Al-Zn-Mg-Cu os precipitados (Mg_2Al_3 , $MgZn_2$ e Al_xZn_xMg) são mais anódicos que a solução sólida adjacente. Em outras ligas, como Al-Cu, os precipitados (Al_2Cu e Al_xCu_xMg) são catódicos em relação à solução sólida empobrecida. Em qualquer um dos casos, ocorre o ataque da região dos contornos de grãos.

O grau de susceptibilidade intergranular é controlado pelas práticas industriais de fabricação, que podem afetar a quantidade, tamanho e distribuição de partículas intermetálicas de segunda fase. A resistência à corrosão

intergranular pode ser obtida pela aplicação de tratamentos térmicos que causem precipitação homogênea ao longo da estrutura dos grãos, ou ao restringir a quantidade de elementos de liga que podem causar este problema. Ligas nas quais não se formam microconstituintes de segunda fase nos contornos de grãos, ou aquelas que possuem potencial de corrosão similar ao da matriz (MnAl6) não são suscetíveis à corrosão intergranular, como é o caso das ligas 3003, 3004 e do alumínio comercialmente puro 1100.

As ligas alumínio-magnésio (5XXX) contendo menos de 3 % de magnésio são bastante resistentes à corrosão intergranular. Em casos não comuns ocorre ataque intergranular na zona termicamente afetada de soldas após meses de exposição a temperaturas moderadamente elevadas (da ordem de 100 °C), em soluções quentes e ácidas de nitrato de amônia (a cerca de 150 °C), ou água potável quente (a 80 °C). Para teores de magnésio mais elevados, a corrosão intergranular não ocorre quando estas ligas são fabricadas de maneira adequada e utilizadas à temperatura ambiente. Entretanto, certas ligas podem se tornar suscetíveis à corrosão intergranular após prolongada exposição em temperaturas elevadas, acima de 27 °C. Este fenômeno é popularmente conhecido como sensitização. O grau de sensibilidade aumenta com o teor de magnésio, com o tempo de exposição à temperatura e com o grau de encruamento (trabalho mecânico de deformação plástica).

As ligas Al-Mg-Si trabalhadas (6XXX) geralmente apresentam alguma susceptibilidade à corrosão intergranular. Com uma composição balanceada de magnésio e silício, que resulta na formação da fase Mg₂Si, o ataque intergranular é menor e também inferior ao que ocorre nas ligas Al-Cu (2XXX) e Al-Zn-Mg-Cu (7XXX). Quando a liga Al-Mg-Si contém teor excessivo de silício (superior ao necessário para formar Mg₂Si), aumenta a corrosão intergranular por causa da forte natureza catódica do constituinte insolúvel de silício.

Nas ligas Al-Cu-Mg (2XXX), tratamentos térmicos que promovem precipitação seletiva nos contornos de grãos provocam susceptibilidade à corrosão intergranular. Já foi comprovado que o resfriamento rápido após o tratamento térmico de solubilização resulta em alta resistência à corrosão intergranular. Analogamente, o resfriamento lento pós-solubilização resulta em susceptibilidade intergranular.

A corrosão intergranular em ligas Al-Zn-Mg-Cu (7XXX) também pode ser afetada por tratamento térmicos. O tratamento térmico, algumas vezes em combinação com a deformação mecânica, é utilizado para melhorar a resistência à corrosão intergranular.

Corrosão por Esfoliação – A esfoliação, também chamada corrosão por camadas ou corrosão lamelar, é um tipo de ataque subsuperficial que ocorre ao longo de múltiplas trilhas paralelas à superfície do metal. O ataque ocorre geralmente ao longo de contornos de grãos (corrosão intergranular), mas também é observado ao longo de estrias de constituintes insolúveis que se distribuíram ao longo de planos paralelos na direção de trabalho mecânico. A esfoliação acontece predominantemente em produtos de pequena espessura e altamente deformados, com microestrutura de grãos alongados. A intensidade da esfoliação aumenta em ambientes ligeiramente ácidos e quando o alumínio está ligado a um metal dissimilar catódico.

A esfoliação é caracterizada pela formação de “folhas”, ou camadas finas de metal ainda não corroído e camadas mais espessas de produtos de corrosão que aumentam o volume do material. Geralmente a esfoliação ocorre a partir de uma beirada cisalhada e se dirige para o interior do material. Quando é suave, assume a forma de bolhas com produto de corrosão se acumulando no centro. Neste caso inicialmente forma-se um pite que penetra para o interior até encontrar uma camada suscetível. O ataque então se transforma em penetração lateral com geração de produtos de corrosão volumosos que provocam o aparecimento de bolhas. A esfoliação não é acelerada pela aplicação de uma tensão e não leva ao trincamento por corrosão sob tensão.

O alumínio comercialmente puro (1XXX) e as ligas alumínio-manganês (3XXX) são bastante resistentes à corrosão por esfoliação, mesmo em diferentes condições de processamento. Em ligas Al-Zn-Mg-Cu (7XXX) a resistência à corrosão por esfoliação pode ser aumentada pela realização de um tratamento térmico de superenvelhecimento (têmperas do tipo T7XXX em ligas trabalhadas), embora com perda de resistência mecânica da ordem de 5 a 10 %. Tratamentos térmicos que propiciem recristalização também podem ter efeitos semelhantes. Ajustes de composição química também podem ser benéficos nesse sentido.

Trincamento por Corrosão sob Tensão – Sob a ação combinada de uma tensão trativa e de um meio corrosivo específico pode ocorrer a ruptura de alguns componentes fabricados com ligas de alumínio devido ao trincamento por corrosão sob tensão. Entretanto, a corrosão sob tensão se limita a ligas Al-Cu-Mg (2XXX) e Al-Mg (5XXX) contendo mais de 3 % de magnésio, e as ligas Al-Zn-Mg-Cu (7XXX). Raramente ocorre corrosão sob tensão em ligas Al-Mg-Si (6XXX). Não ocorre no alumínio comercialmente puro (1XXX), nas ligas Al-Mn (3XXX) ou nas ligas Al-Mg (5XXX) contendo menos de 3 % de magnésio. Ocorre em ambientes agressivos contendo cloretos e, em caso de maior susceptibilidade, ao ar úmido.

A susceptibilidade das ligas de alumínio à corrosão sob tensão depende da microestrutura, a qual por sua vez é influenciada pelo tratamento/processamento prévio. A fragilização por hidrogênio é particularmente severa em ligas Al-Zn-Mg-Cu e em algumas ligas Al-Mg.

Corrosão-Fadiga – Num ambiente corrosivo a curva S/N (tensão por número de ciclos) é deslocada para baixo, ou seja, para valores de tensão mais baixos num determinado número de ciclos, de tal modo que a corrosão-fadiga pode ser descrita como a falha de um metal sob a ação combinada de uma tensão cíclica atuante e um ambiente corrosivo, e o dano resultante é maior do que o que seria provocado pela ação corrosiva e pela fadiga isoladamente. Entretanto, geralmente é difícil diferenciar o aspecto visual da fadiga isolada do aspecto visual da corrosão-fadiga.

As ligas de alumínio, assim como muito aços, apresentam resistência à corrosão-fadiga relativamente baixa, aproximadamente metade da resistência à fadiga ao ar e um quarto da resistência mecânica original do material. Surpreendentemente, a resistência à corrosão-fadiga de uma liga não é afetada significativamente pelo tratamento térmico, mesmo no caso das ligas endurecíveis por precipitação (Al-Cu (2XXX), Al-Mg-Si (6XXX) e Al-Zn-Mg-Cu (7XXX)). As falhas por corrosão-fadiga nas ligas de alumínio são caracteristicamente transgranulares, diferindo assim das falhas por trincamento por corrosão sob tensão, que são normalmente intergranulares. A corrosão localizada na superfície do alumínio, como a formação de pites, ou mesmo a corrosão intergranular, geram concentradores de tensões, reduzindo assim a vida em fadiga.

Ao ar, a umidade relativa apresenta um pequeno efeito na vida em corrosão-fadiga das ligas de alumínio. Entretanto, para valores muito pequenos (umidade relativa inferior a 5 %), a vida em fadiga aumenta ligeiramente. Há pouca diferença no comportamento em corrosão-fadiga das ligas de alumínio para diferentes tipos de água, seja natural, desmineralizada, dura ou em salmoura. Isso é surpreendente, pois a corrosividade normal destas águas no alumínio varia bastante.

Há pouca informação disponível sobre o efeito do processamento termomecânico no comportamento em corrosão-fadiga das ligas de alumínio. Não é possível garantir que uma determinada condição de processamento que proporciona boa resistência ao trincamento por corrosão sob tensão apresentará efeito igual ou semelhante com relação à corrosão-fadiga. Entretanto, é reconhecido o efeito benéfico da adição de cobre às ligas da série 7XXX (Al-Zn-Mg-Cu) no sentido de melhorar a resistência à corrosão-fadiga. O jateamento com partículas abrasivas, que aumenta a resistência à fadiga, provavelmente apresenta o mesmo efeito com relação à vida em corrosão-fadiga das ligas de alumínio, porém o jateamento não deve ser excessivo, o que poderia causar excessiva deformação plástica, que poderia causar susceptibilidade à esfoliação ou ao trincamento por corrosão sob tensão. Revestimentos protetores na superfície do material, inclusive pintura, também podem ser benéficos nesse sentido. A soldagem reduz tanto a vida em fadiga quanto a vida em corrosão-fadiga, mas o jateamento posterior aumenta a vida em corrosão-fadiga, principalmente quando sucedido por pintura.

Cavitação – O dano por cavitação acontece quando um líquido turbulento forma bolhas que entram em colapso ao incidirem sobre a superfície da liga de alumínio, rompendo a camada passivada protetora de óxido, iniciando assim a formação de pites, que podem ser densos o suficiente para provocar o surgimento de uma certa aspereza na superfície do material, ou mesma encruá-la ao ponto de provocar corrosão-fadiga, além de arrancar pequenas porções de material devido ao impacto da ação mecânica. Assim, o dano por cavitação pode ser resultado da corrosão ou da ação mecânica, ou desses dois fatores atuando conjuntamente. Em casos de cavitação suave, provavelmente predomina a ação química, que não pode ser evitada por proteção catódica. Quando predomina a ação mecânica, o dano só pode ser evitado pela eliminação da condição de cavitação, através de modificações no projeto do equipamento.

Corrosão-Erosão – Quando um líquido passa por uma superfície de alumínio excedendo uma certa velocidade, podem se formar sulcos na superfície como resultado das ações química e mecânica. Em geral este fenômeno não corre quando a velocidade do líquido é inferior a 3 m/s. A corrosão-erosão e a cavitação apresentam certa similaridade e podem ocorrer conjuntamente. Apresentam como característica comum um mecanismo de dano na camada de óxido da superfície por ação mecânica, seguido por corrosão localizada. A perda de metal por corrosão pode ser acompanhada por perda de propriedades mecânicas, tanto por fadiga quanto por erosão. Os efeitos adversos da corrosão-erosão e da cavitação podem ser minimizados por diferentes métodos. A cavitação em bombas de água automotivas pode ser minimizada se o líquido de refrigeração contiver inibidores. Modificações de projeto e uso de inibidores podem evitar o acúmulo de óxidos em radiadores que causa corrosão nestes dispositivos.

Corrosão-Atrito – É um processo de desgaste que produz pontos de abrasão e superfícies de alumínio que se movem deslizando em contato entre si num ambiente corrosivo. Estes pontos de abrasão assemelham-se a pites contendo pós pretos, que são pequenas partículas de óxidos de alumínio. Ocorre freqüentemente no transporte de pacotes de chapas, embora também possa ser observada em tubos empacotados com folgas. A susceptibilidade

a esse tipo de corrosão aumenta com o grau de polimento da superfície. O dano pode ser minimizado por empacotamento sob pressão, que evita movimento relativo dentro do pacote. O uso de recobrimento com óleos e de folhas de papel intercaladas também é benéfico nesse sentido. A anodização diminui acentuadamente o dano de corrosão-atrito, que é mais comum no caso de contato entre superfícies de alumínio do que quando o alumínio está em contato com um metal dissimilar. Pode ocorrer em tubos de trocadores de calor no suporte dos tubos e em juntas aparafusadas ou rebitadas de algumas estruturas, como, por exemplo, em caminhões. Este tipo de dano pode ser minimizado por modificações de projeto. Pontos de abrasão reduzem a resistência á fadiga de materiais usados em componentes submetidos a carregamento cíclico.