

1. Introdução

A extração de metais de minérios/compostos minerais foi uma das revoluções tecnológicas mais importantes da história da humanidade, porque possibilitou a fabricação de metais e ligas usados em todos os setores de atividade do ser humano. Contudo, os metais extraídos de minérios/compostos minerais não são termodinamicamente estáveis no estado elementar e tendem a oxidar.

A oxidação é o meio pelo qual os metais extraídos de minérios/compostos minerais podem retornar ao seu estado de origem. É um processo natural que tende a devolver a estabilidade tirada pelo homem por meio de técnicas metalúrgicas. Esse processo natural e espontâneo de oxidação leva a uma perda de massa de metal do material metálico. Esse fenômeno é mais facilmente observado quando os produtos de corrosão são solúveis no meio ou quando os produtos aderidos são removidos. A superfície do material fica com aspecto “roído”, “atacado”. Este aspecto deu origem à palavra corrosão, do latim *corrodere*, que significa “roer”, “atacar”. Portanto, a oxidação tem como resultado o consumo ou a destruição do material metálico com o tempo.

A oxidação de materiais metálicos é uma reação danosa ou degradante porque ela provoca dano irreversível ou degradação do material. Contudo, degradações oriundas de reação química ou eletroquímica podem ocorrer não somente em materiais metálicos, mas também em materiais poliméricos, cerâmicos ou compósitos. A degradação pode ser provocada diretamente ou indiretamente (induzida) pela reação, sendo que o dano pode ser causado no material e/ou em propriedades do material. Sendo assim, o termo corrosão pode ser generalizado para qualquer material quando a degradação é provocada ou induzida por reação química ou eletroquímica entre o material e o seu meio.

Embora o ataque de qualquer material por espécies químicas do meio possa caracterizar um processo corrosivo, o termo corrosão é de uso generalizado em materiais metálicos e em um determinado grupo de materiais cerâmicos, principalmente em materiais cimentícios de construção. Em materiais poliméricos normalmente utiliza-se o termo degradação química para designar a destruição/degradação do material por um agente químico. Em materiais cerâmicos também é comum o termo degradação química.

A corrosão pode ser definida como uma degradação do material e/ou de propriedades do material, provocada ou induzida por reação química ou eletroquímica entre o material e o seu meio. Por esta definição fica evidente que a corrosão é provocada ou induzida pela ação química ou eletroquímica de meios corrosivos/agressivos e pode ocorrer em qualquer material, associada ou não a tensões mecânicas.

Do ponto de vista das aplicações de engenharia a corrosão provoca alterações indesejáveis no aspecto, volume ou massa, ou em propriedades dos materiais. Por outro lado, do ponto de vista do meio ambiente e de alguns processos industriais a corrosão é um fenômeno bem visto. A corrosão destrói e elimina os materiais descartados ou abandonados na natureza e ela é utilizada em alguns setores de produção para formar filmes isolantes ou na preparação ou tratamento de superfície de materiais.

O consumo ou alteração de propriedades do material não são de origem mecânica tais como desgaste, cavitação, tensões/deformações residuais, etc., mas podem atuar simultaneamente com o meio corrosivo/agressivo favorecendo a degradação. A corrosão sob tensão, a corrosão-fadiga, a corrosão-erosão, a corrosão-desgaste e a corrosão-cavitação são provocadas pela ação simultânea da corrosão e de tensões mecânicas.

Em materiais poliméricos muitas vezes a degradação química faz parte de uma etapa secundária da degradação do material. Nesta situação, a reação química é desencadeada por um fenômeno mecânico ou físico precedente como é o caso da ruptura de cadeias poliméricas por esforços mecânicos, calor ou radiação solar. A ruptura de cadeias poliméricas tem como resultado a formação de radicais livres que, em seguida, podem reagir com agentes químicos do meio, como é comumente o caso do oxigênio. Nesses casos, a oxidação faz parte do processo de degradação do material (propagação). Não é a causa inicial da degradação do polímero. Por outro lado, as reações de hidrólise, ozonólise e a auto-oxidação são as causas iniciais e de propagação da degradação do material (veja na seção 15.2).

Dependendo do material e do meio o ataque pode ocorrer na superfície externa e/ou dentro do material. O ataque na superfície é uma reação de interface onde uma ou mais espécies químicas do material são liberadas para o meio na forma de espécies dissolvidas e/ou dispersadas, ou ficam aderidas parcialmente ou totalmente na forma de espécies condensadas.

No ataque interno há dissolução/penetração de uma ou mais espécies químicas no material. A dissolução/penetração de espécies do meio no material, seguida de reação com o material, é mais comum na degradação/corrosão de materiais não metálicos. Um exemplo típico é a penetração de íons sulfato do meio no concreto, seguida de reação com a pasta de cimento endurecida. O produto formado é expansivo e pode provocar fissuramento/desprendimento de concreto. Neste caso, o fissuramento, quando ocorre, é induzido pela reação, pois ele não é provocado diretamente pela reação, mas pela pressão interna do produto da reação (veja na subseção 15.1.3.2).

A oxidação interna de materiais poliméricos é outro exemplo típico em que há absorção de oxigênio da atmosfera seguida de reação química entre o oxigênio e o polímero, provocando a degradação química do material. Na corrosão de materiais metálicos a altas temperaturas, a oxidação interna é um exemplo de dissolução (do oxigênio) seguida de reação de nucleação/crescimento de óxidos internos (veja na subseção 14.5.1).

A dissolução de metais em meio ácido é um caso típico de reação de interface que envolve dissolução de espécies para o meio. Se durante a corrosão houver fragilização do material por hidrogênio atômico proveniente da reação parcial catódica, tem também a dissolução de uma espécie no material (veja nas subseções 10.1.5, 12.2.3.2 a 12.2.3.4).

A reação catódica não provoca consumo de material, mas pode viabilizar a fragilização por hidrogênio e, eventualmente, a fissuração sob tensão. Neste caso, tanto a degradação de propriedades mecânicas, devido à fragilização por hidrogênio, como a degradação do material e de propriedades mecânicas, devido à fissuração sob tensão, são induzidas pela reação catódica (veja na subseção 10.1.5). Na fragilização, o hidrogênio dissolvido não provoca degradação do material, pois não há ruptura de ligações atômicas do material ou formação de compostos

nefastos ao material, mas sua presença na malha cristalina degrada a ductilidade e a tenacidade do material.

Na corrosão localizada a área catódica fica entre os locais de oxidação ou em uma região a parte como é o caso da corrosão galvânica entre dois materiais metálicos diferentes (veja na seção 9.2) ou da corrosão por correntes de fuga (veja na subseção 12.1.1.5). Portanto, a fragilização e, eventualmente, a fratura sob tensão do material podem ocorrer em locais onde não há perda de massa de metal.

Quando a corrosão é generalizada, mesmo não havendo nenhuma alteração de propriedade mecânica da parte metálica não corroída, a força de resistência do material em serviço diminui com a perda de massa generalizada de metal por oxidação por causa da perda dimensional do material.

A altas temperaturas, a danificação do aço-carbono devido à dissolução de hidrogênio atômico nos contornos de grão seguida de reação com a cementita do aço também pode ser considerada como corrosão de acordo com a definição geral apresentada (veja na subseção 14.7.1). A reação do hidrogênio com a cementita do aço resulta na formação de metano. O gás metano exerce pressão interna e pode danificar o aço por meio de deformação plástica e/ou formação de fissuras.

Na cementação gasosa do aço-carbono, por exemplo, a reação entre o carbono difundido do meio e o ferro do aço não é uma reação de corrosão, pois os precipitados formados não são nefastos ao material e nem às suas propriedades para a aplicação desejada. Ao contrário, é uma reação benéfica para a aplicação desejada, realizada propositalmente para melhorar propriedades mecânicas de superfície do material.

Por outro lado, a descarbonetação do aço a altas temperaturas se enquadra na definição de corrosão, pois é uma reação entre uma espécie do meio e o carbono do material, resultando na perda de massa (dispersão do produto) e na degradação de propriedades mecânicas de superfície do aço (veja na subseção 14.7.1). Contudo, a alteração das propriedades mecânicas de superfície ou a perda de carbono não levam, necessariamente, à inutilização do material em serviço ou a um efeito nefasto ao sistema/meio. Mais frequentemente a corrosão resulta em efeitos deletérios (ou deletérios) aos materiais/propriedades, ao meio/produtos e/ou à função/eficiência/vida útil do sistema.

A corrosão é um grande problema porque pode levar à inutilização ou à ruptura de materiais em serviço, mesmo com inspeções periódicas. A falha de materiais em serviço originada pela corrosão pode ter consequências catastróficas em termos de perdas humanas e/ou de materiais. Pode também provocar a contaminação do meio ambiente e, eventualmente, a intoxicação e até mesmo a morte de seres vivos, no caso de falhas em materiais usados na fabricação, armazenamento ou transporte de produtos químicos. A contaminação de alimentos e a perda de qualidade da água potável também podem ser originadas pela corrosão. A preservação da nossa história e de civilizações que nos antecederam também depende de nossa ação contra a corrosão, pois as obras de arte e monumentos históricos estão sujeitos a esse tipo de fenômeno, principalmente em atmosferas mais poluídas.

Os custos diretos estimados da corrosão no mundo todo ficam entre 3% e 3,5% do produto interno bruto (PIB) mundial [1]. Isso significa que os custos diretos anuais no nosso planeta são quantificados em trilhões de dólares americanos, essencialmente com a perda de materiais inutilizados pela corrosão e serviços envolvidos na manutenção, reparação e substituição de materiais corroídos. Isso não inclui os custos indiretos como perda de produto e de produção com a interrupção do sistema, perda de eficiência devido à corrosão, danos ambientais, ferimentos e fatalidades humanas. Esses custos indiretos são estimados iguais aos custos diretos. Somando todos os custos, obtém-se uma soma total anual colossal devido à corrosão, estimada entre 6% e 7% do PIB mundial. Mais da metade desses custos é com a corrosão atmosférica e de 10% a 20% dos custos são com a corrosão induzida por microrganismos [2-3]. Isso significa que os microrganismos são responsáveis por custos anuais enormes; e ainda tem engenheiro que se surpreende ao saber que seres tão minúsculos podem estar na origem de grandes danos materiais, ambientais e/ou de seres vivos.

As mudanças climáticas podem causar um enorme impacto nos custos com a corrosão atmosférica. Basta observar ou imaginar as criações do homem, móveis ou imóveis, que estão em contato com o ar atmosférico para ter noção da grandeza dos efeitos da corrosão atmosférica nos materiais, principalmente nos materiais cimentícios (veja na seção 15.1) e nos materiais metálicos. Considerando que mais da metade dos gastos é com a corrosão atmosférica, uma pequena porcentagem de aumento nesses custos representa uma soma suplementar considerável. Mudanças climáticas que possam resultar, mesmo em uma pequena porcentagem de aumento da corrosão, levam a um grande aumento no custo total.

Os principais fatores ambientais que podem aumentar a corrosão atmosférica são o aumento da temperatura, da umidade relativa e dos poluentes atmosféricos. Portanto, a redução dos poluentes atmosféricos é essencial, não somente para a qualidade de vida, mas também para a redução da corrosão e de seus custos e riscos de acidentes.

A redução da corrosão também reduz a necessidade de recursos naturais suplementares e o consumo de energia correspondente ao processamento de matéria prima e de materiais para substituir os materiais inutilizados pela corrosão.

Estima-se que os custos anuais da corrosão poderiam ser reduzidos de 25% a 30% se as técnicas de prevenção, de proteção e de monitoramento da corrosão fossem utilizadas corretamente [1]. A utilização adequada dessas técnicas também permite reduzir os riscos de acidentes devido a falhas inesperadas de materiais.

Essas estimativas reforçam a necessidade de formação e de qualificação de pessoal com conhecimentos em corrosão. O conhecimento ajuda na conscientização e abre caminho para um melhor aproveitamento das técnicas existentes e para o desenvolvimento de materiais e de técnicas mais eficientes no combate à corrosão.

Referências

- [1] BENÍTEZ, P.; ROCHA, E.; TALUKDAR, S.; HUMBERTO, V.; RODRIGUES, F. *Construction and Building Materials*, 211, p. 1000, 2019.

- [2] BLACKWOOD, D.J. *Corrosion and Materials Degradation*, 1, p. 59, 2018.
- [3] JAVAHERDASHTI, R. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 91, p. 1507, 2011.