

Estudo morfológico e taxa de penetração por corrosão do aço SAE 5160 em meio salino (NaCl): um estudo por ensaio de imersão

Morphological study and corrosion penetration rate of SAE 5160 steel in saline medium (NaCl): a study by immersion test

Estudio morfológico y velocidad de penetración de la corrosión del acero SAE 5160 en medio salino (NaCl): estudio por ensayo de inmersión

Recebido: 30/11/2022 | Revisado: 20/12/2022 | Aceitado: 23/12/2022 | Publicado: 27/12/2022

Jussara Aparecida de Oliveira Cotta

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6914-1176>

Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

E-mail: jussara.cotta@uemg.br

Pedro Henrique Duque de Lucca

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7066-1344>

Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

E-mail: pedro.0615968@discente.uemg.br

Resumo

O metal apresenta inúmeras aplicações e características que permitem sua aplicação em diferentes condições ambientais. Entretanto, é necessário que o aço seja produzido para determinada condição, pois as características químicas e físicas do aço podem ser afetadas em caso de incompatibilidade com o meio. Devido aos efeitos que a corrosão pode acarretar em casos de falha crítica de processos, são envolvidos elevados custos com manutenção e substituição de peças e equipamentos. Os estudos de corrosão têm crescido com objetivo de eliminar os efeitos corrosivos, com base na prevenção e desenvolvimento de aços com maior resistência ao fenômeno. O aço SAE 5160 é susceptível à corrosão quando em condições que possam ocorrer reações catódicas, com a presença de oxigênio, água e sais dissolvidos. O objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento do aço SAE 5160 em diferentes concentrações de NaCl em solução, como forma de verificar o efeito do meio na corrosão do aço utilizando-se ensaio de imersão durante 10 semanas. Aplicou-se uma metodologia de natureza aplicada e, quanto aos objetivos, uma pesquisa explicativa. O enfoque foi de uma pesquisa quali-quantitativa. O efeito foi verificado a partir da taxa de penetração por corrosão (TPC), para determinar a corrosividade dos meios. Ao final, foi utilizado um microscópio metalográfico para caracterizar a morfologia da corrosão nos corpos de prova (CP's). Conclui-se que o aço SAE 5160 apresentou TPC moderada nos meios e o aumento do teor de NaCl eleva a taxa de corrosão. Observa-se formação de corrosão alveolar e por pites na superfície dos CP's.

Palavras-chave: Aço; SAE 5160; Corrosão; Meio salino.

Abstract

The metal has numerous applications and characteristics that allow its application in different environmental conditions. However, it is necessary that the steel be produced for a certain condition, as the chemical and physical characteristics of the steel can be affected in case of incompatibility with the environment. Due to the effects that corrosion can have in cases of critical process failure, high costs are involved in maintenance and replacement of parts and equipment. Corrosion studies have grown with the aim of eliminating corrosive effects, based on the prevention and development of steels with greater resistance to the phenomenon. SAE 5160 steel is susceptible to corrosion when under conditions where cathodic reactions can occur, with the presence of oxygen, water and dissolved salts. The objective of this work was to evaluate the behavior of SAE 5160 steel in different concentrations of NaCl in solution, as a way of verifying the effect of the medium on the corrosion of steel using an immersion test for 10 weeks. An applied methodology was applied and, regarding the objectives, an explanatory research. The focus was a qualitative and quantitative research. The effect was checked from the corrosion penetration rate (CPR) to determine the corrosivity of the media. At the end, a metallographic microscope was used to characterize the morphology of corrosion in the specimens (CP's). It is concluded that the SAE 5160 steel showed moderate CPR in the media and the increase in the NaCl content increases the corrosion rate. Alveolar and pitting corrosion formation is observed on the surface of the CP's.

Keywords: Steel; SAE 5160; Corrosion; Saline environment.

Resumen

El metal tiene numerosas aplicaciones y características que permiten su aplicación en diferentes condiciones ambientales. Sin embargo, es necesario que el acero sea producido para una determinada condición, ya que las

características químicas y físicas del acero pueden verse afectadas en caso de incompatibilidad con el medio ambiente. Debido a los efectos que puede tener la corrosión en casos de fallas críticas en los procesos, se involucran altos costos en el mantenimiento y reemplazo de partes y equipos. Los estudios de corrosión han crecido con el objetivo de eliminar los efectos corrosivos, basados en la prevención y desarrollo de aceros con mayor resistencia al fenómeno. El acero SAE 5160 es susceptible a la corrosión cuando se encuentra en condiciones en las que pueden ocurrir reacciones catódicas, con presencia de oxígeno, agua y sales disueltas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento del acero SAE 5160 en diferentes concentraciones de NaCl en solución, como forma de verificar el efecto del medio sobre la corrosión del acero mediante un ensayo de inmersión durante 10 semanas. Se aplicó una metodología aplicada y, en cuanto a los objetivos, una investigación explicativa. El enfoque fue una investigación cualitativa y cuantitativa. El efecto se comprobó a partir de la tasa de penetración de la corrosión (TPC) para determinar la corrosividad del medio. Al final se utilizó un microscopio metalográfico para caracterizar la morfología de la corrosión en las probetas (CP's). Se concluye que el acero SAE 5160 presentó TPC moderado en los medios y el aumento del contenido de NaCl aumenta la velocidad de corrosión. Se observa formación de corrosión alveolar y por picaduras en la superficie de los CP's.

Palabras clave: Acero; SAE 5160; Corrosión; Medio salino.

1. Introdução

A corrosão pode ser definida, segundo Gentil (2007), como a deterioração de um material, em geral metálico, por ação química ou eletroquímica do ambiente, podendo estar associada a esforços mecânicos, ou como uma tendência natural dos metais a retornarem ao seu estado mais estável. No geral, materiais metálicos puros ou em ligas tendem a retornar ao seu estado mais estável quando em contato com meios corrosivos, na forma de óxidos, hidróxidos e sulfetos, sem a necessidade de fornecimento de energia para as reações.

Conforme Gentil (2007), a corrosão pode ser vista como inversa aos processos metalúrgicos de extração do metal a partir dos seus minérios. A corrosão tende a oxidar os metais formando um óxido semelhante ao minério do qual foi extraído. Ao exemplo da hematita Fe_2O_3 , principal óxido de ferro encontrado na natureza, que é semelhante à ferrugem $Fe_2O_3.nH_2O$.

Ao contrário da extração dos metais, que passam por processos metalúrgicos, podendo necessitar de alto consumo energético, como a redução do minério de ferro em que o consumo de combustível pode impactar em cerca de 50% do valor final do produto.

Ainda conforme Callister (2008), a corrosão é um ataque destrutivo que ocorre de forma não intencional. Inicia-se na superfície do metal a partir de uma atuação eletroquímica. A corrosão torna-se um problema, pois acontece em proporções significativas, impactando diretamente no PIB de nações industrializadas em cerca 5%, gastos relativos à prevenção e reposição de produtos degradados. Estudo realizado pela *International Zinc Association* - IZA (2015) e pela Universidade de São Paulo (USP) estimou que o Brasil gastou cerca de 4% do PIB com a reposição de equipamentos afetados pela corrosão, cerca de R\$ 236 bilhões. Este valor pode ser contabilizado acima do estimado pela pesquisa se incluídos os custos indiretos, referentes às consequências causadas pela corrosão, como paralisações acidentais, perda de produto, perda de eficiência, contaminação de produtos, superdimensionamentos de projetos. Ainda a estes pontos devem ser somados os itens de maior valor que correspondem à segurança das pessoas e impactos ao meio ambiente.

Logo, o estudo da IZA e USP sustenta a importância de avaliar o comportamento de aços e metais diante de meios corrosivos e do ambiente de operação para determinar a intensidade do ataque, períodos de manutenção e proteções na superfície do material. Segundo Gentil (2007), a corrosão de materiais metálicos é influenciada por vários fatores que modificam o ataque químico e eletroquímico. Assim, como não há um único método de ensaio de corrosão para determinar as implicações, torna-se necessário utilizar vários ensaios.

Os ensaios laboratoriais são pautados em normativas que buscam experimentalmente trazer a realidade de operação, para simular o comportamento no qual o material terá em campo e possibilitar a previsão dos impactos causados. A exemplo da norma ASTM International G31-72 (2004) relativa ao ensaio de imersão, que simula as condições nas quais toda a área do

material está em contato constante com o meio corrosivo e permite avaliar a perda de massa causada pela corrosão. Esse tipo de ensaio, quando bem executado e referenciado, permite prever o impacto causado pelo meio corrosivo no material a ser estudado.

Com base nesse contexto, surgiram as questões condutoras deste trabalho: qual a taxa de corrosão do aço SAE 5160 em contato com soluções eletrolíticas de NaCl, simulando uma situação real de exposição do corpo de prova em uma concentração do sal próxima do meio marinho, sem a aplicação das medidas de proteção? Em quais concentrações do eletrólito é possível ter uma aplicação segura e com intervalos de manutenção acessíveis?

Este trabalho teve por objetivo avaliar a taxa de corrosão, perda de massa, do aço SAE 5160 em meio salino (NaCl), por meio do ensaio de imersão. Foi avaliado a corrosão do aço em meios contendo NaCl como eletrólito, através do ensaio de imersão por 10 semanas.

Após a realização do ensaio, foi determinada a taxa de penetração por corrosão (TPC), em conjunto com o estudo cinético da ação corrosiva a partir da análise gravimétrica. Ao final foi verificada a morfologia da corrosão formada na superfície dos corpos de prova (CP's).

Metodologicamente, esta foi uma pesquisa de natureza aplicada, quali-quantitativa quanto à abordagem, descritiva e exploratória quanto aos seus objetivos, que utilizou trabalhos bibliográficos e experimentais para pautar seus procedimentos técnicos.

Os principais autores que serviram de base para o trabalho foram: Gentil (2007), Fontana (1986), Callister (2008), Silva e Mei (1988), Chiaverini (1996) e ASTM International G31-72 (2004).

1.1 O corpo de prova em estudo, os tipos e os ensaios de corrosão

Segundo Callister (2008), os aços são ligas de ferro-carbono que podem conter outros elementos de liga e cada aço pode ter uma concentração e tratamentos térmicos específicos, portanto, o aço pode ser classificado quanto ao seu teor de carbono e elementos de ligas. São denominadas ligas ferrosas aquelas que contém o ferro como seu principal constituinte. As ligas de ferro são produzidas em uma escala maior que qualquer outra liga metálica devido a três fatores: o elemento ferro é abundante em toda crosta terrestre; ligas de aço e ferro metálico podem ser extraídos, fabricados e refinados com uma atividade relativamente econômica; a versatilidade das ligas ferrosas devido às suas propriedades químicas e físicas, permite aplicação ampla na engenharia. No entanto, a principal desvantagem das ligas ferrosas é a predisposição a efeitos corrosivos (Callister, 2008).

O aço 5160 é um aço-carbono baixa liga, cromo e manganês como elementos de liga, material com ótimo custo-benefício que adquire boas propriedades com a aplicação de tratamentos térmicos. Este aço é amplamente utilizado para fabricação de molas (Dias *et al.*, 2018). A Tabela 1 mostra a composição química do aço SAE 5160 (SAE J404:2009).

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 5160 (SAE J404:2009).

Composição Química (%)						
NºSAE	C	Mn	P	S	Si	Cr
5160	0,56-0,64	0,75-1,00	≤0,030	≤0,040	0,15-0,35	0,70-0,90

Fonte: Guia do Aço ArcelorMittal (2019).

Fontana (1986) afirma que a corrosão é definida como a deterioração ou destruição do material devido ao contato com o ambiente. A corrosão dos metais pode ser considerada o contrário da metalurgia extrativa.

A definição apresentada pela *International Standard Organization* (ISO,1986), determina que a corrosão é uma interação físico-química entre o metal e o ambiente, conseqüentemente a interação tem alterações nas propriedades do metal levando ao comprometimento das suas funções e do meio em que está inserido na maioria dos casos.

Assim a corrosão pode ser definida como a reação do metal com o ambiente, na qual o metal é convertido a um estado não metálico de menor energia. Quando isso ocorre, o metal perde suas propriedades essenciais, tais como resistência mecânica, elasticidade e ductilidade. Durante o processo corrosivo, dependendo das características microestruturais da liga metálica (impurezas, segundas fases, regiões de segregação), células eletroquímicas de ação local são favorecidas. Essas células correspondem a áreas na superfície exposta ao meio que apresentam diferenças de potenciais eletroquímicos, contendo regiões catódicas (maior potencial), em que ocorrem preferencialmente as reações de redução; e regiões anódicas (menor potencial), em que ocorrem preferencialmente as reações de oxidação/dissolução (Araújo, 2022).

Chiaverini (1996) corrobora com a definição de que a corrosão é um ataque gradual ou contínuo do metal pelo meio vizinho, podendo ser a atmosfera natural ou contaminada e meios químicos nos três estados físicos, sólido, líquido e gasoso. Admite-se que a corrosão não passa de uma ação química, eletroquímica, em que a velocidade de ataque não só depende do meio circundante, mas também do tipo de metal ou liga que está sofrendo degradação.

Ainda de acordo com Chiaverini (1996), a perda de peças metálicas devido a ação da corrosão tem preocupado engenheiros e metalurgistas que buscam aperfeiçoar os métodos de proteção e também o desenvolvimento de novas ligas mais resistentes à ação da corrosão (Lima *et al.*, 2020). Fontana (1986) afirma que nos Estados Unidos poderiam ser economizados cerca de \$30 bilhões de dólares e evitados acidentes como o colapso da ponte *Silver Bridge*, sobre o *Ohio River*, que causou a morte de 40 pessoas e custou \$500 milhões de dólares.

É possível constatar que a corrosão não depende apenas do material metálico que está sendo utilizado, sendo necessária uma avaliação profunda das condições do ambiente, operacionais e também do metal, conforme exposto por Gentil (2007).

No estudo dos processos corrosivos devem ser sempre consideradas as variáveis dependentes do material metálico, do meio corrosivo e das condições operacionais, pois o estudo conjunto dessas variáveis permitirá indicar o material mais adequado para ser utilizado em determinados equipamentos ou instalações (Gentil, 2007, p.45).

O princípio eletroquímico da corrosão eletroquímica se baseia nas reações de oxirredução. Segundo Gentil (2007) para determinar a reação completa da reação de oxirredução deve-se combinar as duas reações do processo, oxidação e redução, para chegar à equação final em que não há elétrons livres.

- **Reação anódica** (Equação geral da oxidação de um metal)



Ainda segundo o mesmo autor (2007), as reações catódicas podem ocorrer na redução dos seguintes elementos:

- **Meio ácido não aerado** (Redução do íon H^{+})
$$n\text{H}^{+} + n\text{e}^{-} \rightarrow n/2 \text{H}_2$$
- **Meio ácido aerado** (Redução do oxigênio)
$$\text{O}_2 + 4\text{H}^{+} + 4\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$$
- **Meio aerado** (Redução do oxigênio)
$$n/2 \text{O}_2 + n\text{e}^{-} \rightarrow \text{O}^{-n}$$
- **Meio aquoso neutro ou básico aerado** (Redução do oxigênio)
$$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^{-} \rightarrow 4\text{OH}^{-}$$

Na ação química da corrosão química, as reações são diretas do material metálico ou não metálico, com o meio corrosivo. Portanto não geração de corrente elétrica, ao contrário do método eletroquímico (Gentil, 2007).

Tratando-se dos meios contendo sais como eletrólitos, podemos citar o exemplo do NaCl, segundo Garcias (1958), apud Armstrong e Miall, os sais dissolvidos na água do mar encontram-se em cerca de 3,5%, sendo o cloreto de sódio o sal de maior concentração, 2,7213%. Segundo Gentil (2011), a alta condutividade das soluções contendo NaCl proporciona reação indireta pela difusão entre o Fe^{+2} e OH^- , formando $\text{Fe}(\text{OH})_2$, reação que ocasiona maior concentração de oxigênio na região catódica, ocasionando despolarização. Fator que implica em um aumento da velocidade da reação catódica.

Segundo Fontana (1986), é conveniente classificar a corrosão de forma visual de acordo com sua manifestação no material e na maioria dos casos é possível realizar a avaliação do material corroído a olho nu. Em alguns casos, é necessária a utilização de equipamentos de ampliação. Gentil (2007) corrobora com a afirmação anterior, concluindo que a corrosão é uma manifestação destrutiva que ocorre na superfície do metal. Logo, ela pode ser apresentada considerando-se a aparência e ainda somados os mecanismos de ataque e os meios corrosivos. Callister (2008) também sustenta que a avaliação visual pela forma na qual a corrosão se manifesta é uma maneira efetiva.

A corrosão pode se manifestar das seguintes formas: uniforme, por pite, intergranular, galvânica, alveolar, por fissuras, por erosão e por tensão.

A corrosão uniforme é uma das formas mais comum de ocorrência, em decorrência de ações químicas ou eletroquímicas por toda superfície da peça. Ocorre a perda de espessura do metal e em consequência a falha (Fontana, 1986). Segundo Callister (2008), a ação corrosiva apresenta-se por toda superfície metálica que está exposta, deixando em alguns casos um depósito ou incrustação. Exemplos desses fenômenos é o escurecimento de pratarias e a presença de ferrugem generalizada na superfície do aço.

Segundo Fontana (1986), a corrosão por pites é extremamente localizada, quando ocorrem pequenos orifícios sobre o metal. Em grande parte dos casos, eles se apresentam com pequenos diâmetros, mas também podem ocorrer em tamanhos maiores, distribuindo-se pela superfície. Os pites são caracterizados pelo seu diâmetro e profundidade. Esta forma de corrosão é apresentada como crítica para processos, devido a sua difícil identificação e a falha ocorrendo de forma repentina devido a perfuração do material metálico. Callister (2008) propõe que os pites podem ocorrer devido a um defeito superficial localizado, pois foi observado que superfícies polidas apresentam maior resistência ao surgimento de pites.

A corrosão intergranular é um tipo de corrosão que ocorre de forma preferencial nos contornos de grão de algumas ligas e em ambientes específicos. O resultado é a fratura do material metálico ao longo dos contornos de grão. Este tipo de corrosão está mais presente em aços inoxidáveis devido a precipitação de carbeto de cromo (Cr_{23}C_6) em longos aquecimentos a temperaturas entre 500 e 800°C, que empobrece o cromo da região do contorno, deixando-a mais suscetível à propagação da corrosão (Callister, 2008).

A corrosão galvânica ocorre quando há a presença de dois metais distintos imersos em um meio corrosivo ou condutivo gera uma diferença de potencial. Se houver contato entre ambos que permita o fluxo de elétrons, provoca a corrosão do metal menos resistente. O metal mais resistente comporta-se como catodo e o menos resistente como anodo (Fontana, 1986).

Segundo Gentil (2007), a corrosão alveolar se propaga na superfície metálica, gerando sulcos semelhantes a alvéolos e geralmente apresentam diâmetros maiores que sua profundidade.

A corrosão eletroquímica pode ocorrer em frestas entre duas peças do mesmo material metálico, chamada de corrosão por fissuras, devido a diferença de concentração de íons ou gases dissolvidos na solução eletrolítica. A corrosão é evidenciada no local que apresenta menor concentração, em frestas ou sob depósitos de sujeira ou produtos de corrosão em que a solução fica estática e há liberação do oxigênio dissolvido. As frestas devem ser suficientes para que o material fique concentrado no local e não permita sua evasão (Callister, 2008).

A corrosão sob tensão é causada pela ação simultânea de um esforço mecânico sobre o material e ação de um meio corrosivo específico (Fontana, 1986). Segundo Callister (2008), mesmo materiais inertes ao meio corrosivo se tornam frágeis quando expostos a tensões. Eventualmente, pequenas trincas se formam e se propagam perpendicularmente a direção da tensão.

Em diversas discussões sobre a corrosão dos metais, o meio em que ele se encontra é determinante para verificar a ação corrosiva. O meio pode afetar desde a ocorrência ou não do processo de corrosão até a velocidade e a forma em que ele se manifesta na superfície do metal.

Segundo Callister (2008):

Os ambientes corrosivos incluem a atmosfera, soluções aquosas, solos, ácidos, bases, solventes inorgânicos, sais fundidos, metais líquidos e, por fim, mas não menos importante, o corpo humano. Em uma base ponderada, a corrosão atmosférica é a responsável pelas maiores perdas. (Callister, p.475, 2008).

A fim de verificar o comportamento dos metais nos meios, para assim determinar sua aplicabilidade, os ensaios de corrosão são de grande relevância para simular a agressividade do meio em que o material será aplicado. Atualmente, diversos trabalhos abordam a aplicação de ensaios de campo e laboratório, como de Ostroski, 2019 e Silva, 2021.

Em campo, são reproduzidas as condições reais do meio corrosivo por longos períodos, onde as condições do ensaio variam constantemente e são de difícil controle. Já os ensaios de laboratório trazem uma simulação de um meio corrosivo com exatidão, sem variações. As condições do ensaio podem ser controladas e aceleradas para obtenção do resultado, porém não trazem os resultados exatos do ambiente de campo (Gentil, 2007).

Os ensaios de laboratório reproduzem de forma variada a aplicação dos metais, como o ensaio de corrosão em metais por imersão, que avalia a perda de massa (método gravimétrico) do metal imerso em meio corrosivo (Quattrocchi, et al., 2022). Uma das principais normas utilizadas para padronização desse ensaio é a ASTM International G31-72, determinando as condições práticas e de controle para a realização do ensaio e a determinação dos resultados da taxa de penetração por corrosão (TPC).

2. Metodologia

Este trabalho abordou uma metodologia de natureza aplicada e, quanto aos objetivos, caracterizou-se como uma pesquisa explicativa. O enfoque foi de uma pesquisa quali-quantitativa, e em relação aos procedimentos técnicos, seguiu a linha bibliográfica e experimental.

Quanto aos objetivos, descreveu-se como uma pesquisa explicativa por avaliar um fenômeno já conhecido onde busca-se determinar a relação causa e efeito. Segundo Gil (1999), é um tipo de pesquisa que já existe fundamento, mas busca-se aprofundar o conhecimento para sustentar as razões na qual determinado fenômeno acontece. Mattar (2001) apresenta a pesquisa explicativa de forma a fugir do senso comum, de que determinado efeito tem apenas uma causa, conhecida como causalidade determinística. O meio científico tem entendimento de que é difícil atribuir apenas uma causa para determinado efeito, logo são trabalhadas prováveis causas para ocorrência de um evento, termo conhecido como causalidade probabilística.

Segundo Lakatos e Marconi (2011), a pesquisa qualitativa busca aprofundar e verificar as alterações, não apenas na quantidade e sim com alteração ou transformação de um estado para o outro, determinando o momento em que a quantidade se transforma em qualidade. Já o método quantitativo é colocado como a base científica, na qual se obtém respaldo objetivo, matemático e estatístico.

O trabalho foi realizado, primeiramente, através de uma pesquisa bibliográfica a partir de pesquisas e artigos de especialistas sobre as formas de corrosão, meios corrosivos e a ação dos meios corrosivos no aço SAE 5160. A etapa seguinte

constituiu-se na investigação prática do comportamento do aço em contato com meios corrosivos, seguindo as normativas do ensaio de imersão. Logo, a pesquisa caracterizou-se como experimental.

O método experimental corresponde a submeter os objetos de estudo sob condições controladas e conhecidas pelo pesquisador, a determinadas variáveis e assim iniciar a avaliações de resultados conforme as situações submetidas do objeto (Prodanov e Ernani, 2013, apud Gil, 2008).

3. Material e Métodos

Todo desenvolvimento laboratorial foi realizado no Centro Tecnológico da Universidade do Estado de Minas Gerais (CTec UEMG), na Unidade João Monlevade, em específico nos laboratórios de soldagem e metalografia.

Durante as 10 semanas de ensaio de imersão, os corpos de prova (CP's) foram submersos em soluções de cloreto de sódio (NaCl) com concentrações de 3,5%, 2,0%, 1,0% e 0,50% e também em água deionizada e água doméstica. A solução de NaCl foi escolhida para simular os efeitos que os íons dissolvidos na água do mar podem exercer sobre o aço, quando em contato direto e constante. As soluções adotadas como padrão foram utilizadas como grupo controle para comparar os resultados obtidos. Os ensaios foram baseados nas condições descritas para avaliar a severidade dos efeitos corrosivos diante das condições aplicadas. Os gráficos e tabelas gerados, auxiliaram no entendimento a partir da apresentação dos resultados obtidos.

O aço SAE 5160, que é amplamente usado na fabricação de mola e com aplicação em outros setores devido as suas características de dureza, ductilidade e resistência à fadiga. As amostras utilizadas no estudo por ensaio de imersão foram cedidas por uma empresa siderúrgica, do setor de aços longos, com composição química segundo Tabela 1. As amostras foram cedidas em formato cilíndrico, fio-máquina, com comprimento médio de 40 cm e diâmetro 15,9 mm.

A preparação inicial das amostras foi realizada para retirar os óxidos de ferro, carepa provenientes do processo de resfriamento, presente na superfície do fio-máquina. Os óxidos foram retirados utilizando uma esmerilhadeira manual, com lixa de óxido de alumínio de grão 50. Em seguida foi realizado o corte da amostra, utilizando serra fita, produzindo 18 CP's.

Os CP's foram limpos e polidos utilizando água, sabão e esponja de aço e secos com papel toalha. Foi obtida a massa de cada corpo de prova, utilizando uma balança analítica, realizada medição do comprimento e diâmetro utilizando um paquímetro (Tabela 2).

Foi preparada uma solução 3,5% de NaCl. Essa solução foi diluída para 2,0, 1,0 e 0,5%, e foram utilizados como meio corrosivo. Com o pHmetro, determinou-se o pH de cada solução. Também foi avaliada a condição com o corpo de prova exposto a água deionizada que foi utilizada para as diluições (branco) e água de torneira.

Em béqueres de 100 mL foram adicionados 50 mL das soluções de cloreto de sódio de diferentes concentrações % (m/v), água deionizada e água de torneira e imersos os CP's, respectivamente identificados. Os ensaios foram realizados em triplicata, para obter reprodutividade dos resultados obtidos pelos efeitos das condições no aço, segundo a Tabela 2.

Tabela 2 - Identificação dos meios e características físicas dos CP's.

Identificação*	Meios corrosivos	Massa (g)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
1A	NaCl 3,5%	58,100	15,8	37,6
1B	NaCl 3,5%	56,705	15,9	36,4
1C	NaCl 3,5%	55,518	15	36
2A	NaCl 2%	55,595	15,9	35,9
2B	NaCl 2%	57,736	15	37,35
2C	NaCl 2%	54,962	15,9	35,95
3A	NaCl 1%	57,825	15,7	37,4
3B	NaCl 1%	58,113	15,1	37,5
3C	NaCl 1%	54,884	14,95	15,4
4A	NaCl 0,5%	50,339	15	35,3
4B	NaCl 0,5%	56,221	15,1	36,7
4C	NaCl 0,5%	54,348	15	35,15
5A	Água Deionizada	56,641	15,8	36,7
5B	Água Deionizada	55,274	15,85	35,55
5C	Água Deionizada	52,961	15,9	34,25
6A	Água de Torneira (Doméstica)	54,824	15,9	35,8
6B	Água de Torneira (Doméstica)	57,698	15,8	37,05
6C	Água de Torneira (Doméstica)	54,994	15,9	36,95

*A, B e C – triplicata. Fonte: Autores (2022).

Semanalmente, os CP's eram retirados da solução, feito a limpeza da superfície e pesados. Os meios corrosivos (soluções eletrolíticas, água deionizada e água de torneira) eram descartados e substituídas por uma nova solução. Após 10 semanas de ensaio, com ciclos de limpeza e troca das soluções semanalmente, os CP's foram limpos com sabão neutro e esponja de aço para retirar os produtos da corrosão, secos, embalados em papel filme colocados no dessecador para evitar contato com umidade e atmosfera oxidante, e posteriormente feito a análise dos tipos de corrosão que ocorreram na superfície dos CP's utilizando a técnica de microscopia óptica.

3.1 Cálculo da Taxa de Penetração por Corrosão

Segundo Callister (2008), a taxa de corrosão é definida como a perda de material como consequência da ação corrosiva. Ela é expressa como Taxa de Penetração da Corrosão (TPC), que determina a perda de espessura do material por unidade de tempo, conforme a Equação 1.

$$\text{Onde: } \text{TPC} = \frac{K \cdot W}{\rho \cdot A \cdot t} \quad (\text{eq.1})$$

K = Constante que o valor depende do sistema de unidade utilizado; W = Perda de massa após o tempo de exposição em mg; ρ = Massa específica em g/cm^3 ; A = Área exposta da amostra em cm^2 ; t = Tempo de exposição em h.

A TPC é convenientemente expressa em mm/yr (milímetros por ano) e neste caso, $k = 87,6$. Para a maioria das aplicações, TPC é menor que 20 mpy (milésimo polegadas por ano). A norma NACE SP0775-2013 (2013) classifica a severidade da corrosão conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da corrosão conforme a degradação do material.

Taxa de corrosão uniforme (mm/ano)	Taxa de pite (mm/ano)	Corrosividade
< 0,025	< 0,13	Baixa
0,025 a 0,120	0,130 a 0,200	Moderada
0,130 a 0,250	0,210 a 0,380	Alta
> 0,250	> 0,380	Severa

Fonte: NACE SP0775-2013 (2013).

3.2 O Estudo Cinético

Foi realizado o estudo cinético (perda de massa x tempo) e verificada a ordem da reação de corrosão. Foi verificado, ainda, a relação entre a concentração (teor de NaCl) e a velocidade da reação, para cada solução eletrolítica ou meio de imersão. Para tal estudo, foi levado em consideração o meio como um sistema homogêneo, sendo a área dos corpos de prova desprezível.

3.3 Forma de Corrosão

Segundo Gentil (2011), os tipos de corrosão podem ser verificados avaliando a aparência, forma de ataque, as diferentes causas de corrosão e seus mecanismos. Logo, pode se obter a corrosão conforme a morfologia apresentada.

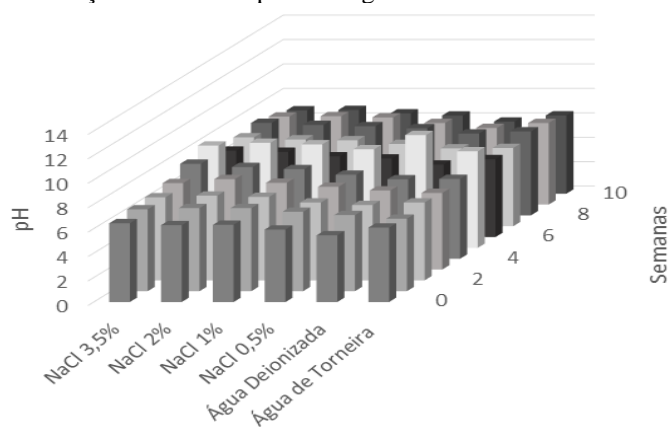
Os tipos específicos de corrosão que ocorreram na superfície do corpo de prova após o ensaio de imersão foram identificados, utilizando a técnica de microscopia óptica, com o auxílio do microscópio metalográfico PanTec. As análises foram realizadas na Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Unidade João Monlevade, no Centro Tecnológico da Universidade do Estado de Minas Gerais (CTec).

4. Resultados e Discussão

O valor do pH tem grande importância na taxa de corrosão do aço, sendo que ambientes mais ácidos ou extremamente básicos apresentam situações severas de corrosão. Portanto, é importante monitorar o pH das soluções com solução básica e também as soluções padrão.

O Gráfico 1 apresenta os valores iniciais de pH das soluções eletrolíticas e água (tempo 0) e a cada semana (7 dias) de exposição dos CP's ao longo das 10 semanas.

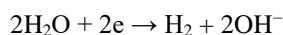
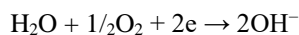
Gráfico 1 - Variação semanal do pH ao longo das 10 semanas de ensaio de imersão.



*Soluções eletrolíticas eram trocadas semanalmente. Fonte: Autores (2022).

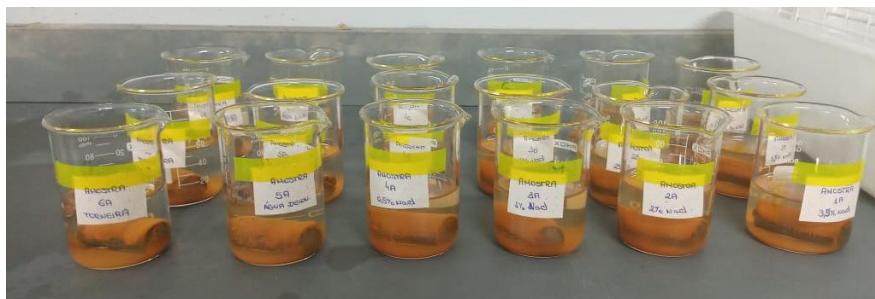
Analisando o Gráfico 1 é possível avaliar o aumento do pH dos meios corrosivos a cada semana de exposição dos CP's, devido à formação de hidroxila durante as reações de corrosão em meio aerado. Essa característica é presente em soluções que contém sais dissolvidos no meio, elevando sua basicidade.

Segundo Gentil (2011), a região catódica (solução) torna-se básica devido à formação de hidroxila (OH^-), consequentemente elevando o pH. Nessa condição, podem ocorrer as reações:



As condições das reações para formação de OH^- podem ser reforçadas pela condição na qual foi realizado o ensaio, em que a exposição das soluções ao ar permitiram a dissolução de oxigênio no meio. A Figura 1 apresenta os CP's ainda com os produtos da corrosão.

Figura 1 - CP's imersos nos meios corrosivos após 1 semana.



Fonte: Autores (2022).

Visualmente verificando a Figura 1, é possível identificar o início da corrosão nos CP's, onde há deposição do aço oxidado ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) na parte superior dos CP's e sedimentado no fundo dos béqueres. Com inspeção visual não é possível avaliar a diferença na evolução da corrosão entre os CP's.

Na Figura 2, usada como exemplo, é evidenciada a formação de oxidação em toda superfície do CP. Os produtos da reação de corrosão manifestam-se de 3 formas distintas no CP. O produto da corrosão evidenciada pela cor avermelhada é referente à formação da ferrugem ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), o óxido de ferro hidratado, semelhante ao que é encontrado na natureza. É possível observar pontos de corrosão localizada, que podem caracterizar a formação de pites e corrosão alveolar na superfície do aço (Figura 2), sendo necessário instrumentação para verificar a suposição. Também é observada a formação de óxidos de ferro com cor escura, característica da formação de FeO , Fe_2O_3 e Fe_3O_4 e, segundo Gentil (2011), a característica escura da superfície pode estar atrelada à corrosão gráfitica, que forma um filme de grafite em que seus poros são vedados pelos produtos da corrosão, Fe_2O_3 e Fe_3O_4 . Ele pode reduzir ou impedir a corrosão do aço. Nesse caso, pode haver a formação de uma barreira efetiva contra o meio corrosivo e a difusão de oxigênio. As condições verificadas no CP imerso na água deionizada (5A), Figura 2, são encontradas nos demais CP's.

Figura 1 - Tipo de corrosão evidenciada no CP imerso na água deionizada (5A).



Fonte: Autores (2022).

Durante o período de ensaios, os CP's foram limpos semanalmente e registrado a massa dos mesmos. Após um período de 10 semanas de ensaio foi verificada a perda de massa (método gravimétrico) dos CP's e calculada a TPC, a partir das dimensões médias e média da perda de massa dos CP's. A Tabela 4 indicam a perda de massa média dos CP's após 10 semanas de exposição e TPC para cada meio corrosivo.

Tabela 4 - Perda de massa (g) dos CP's e TPC (mm/ano).

Meios corrosivos	Perda Massa (g)*	TPC (mm/ano)
NaCl 3,5%	0,206 ± 0,013	0,0608
NaCl 2%	0,207 ± 0,020	0,0617
NaCl 1%	0,201 ± 0,010	0,0582
NaCl 0,5%	0,181 ± 0,009	0,0548
Água deionizada	0,162 ± 0,008	0,0499
Água de torneira (Doméstica)	0,186 ± 0,004	0,0566

*Média da triplicata. Fonte: Autores (2022).

Observando a Tabela 4, pode-se perceber maiores efeitos da corrosão nas soluções com sais de NaCl dissolvidos, do que nas soluções padrão. Generalizando, pode-se afirmar que aumento das concentrações de NaCl podem aumentar as propriedades corrosivas do meio. Realizando a comparação entre as soluções de diferentes percentuais de NaCl, é possível notar que há um aumento da corrosão com o aumento da concentração do eletrólito em solução (Gomes, et al., 2019).

Ainda tratando-se em relação os meios corrosivos de diferentes teores de cloreto de sódio, o principal mecanismo de corrosão pode ter sido determinado pela alta condutividade das soluções. Segundo Gentil (2011), a alta condutividade proporciona reação indireta pela difusão entre o Fe^{2+} e OH^- , formando $Fe(OH)_2$, reação que ocasiona maior concentração de oxigênio na região catódica, ocasionando despolarização. Portanto, o fenômeno poderá ter ocorrido nas soluções de NaCl, fator que gera um aumento no consumo de elétrons na reação catódica e, conseqüentemente, acelerando a reação de oxidação.

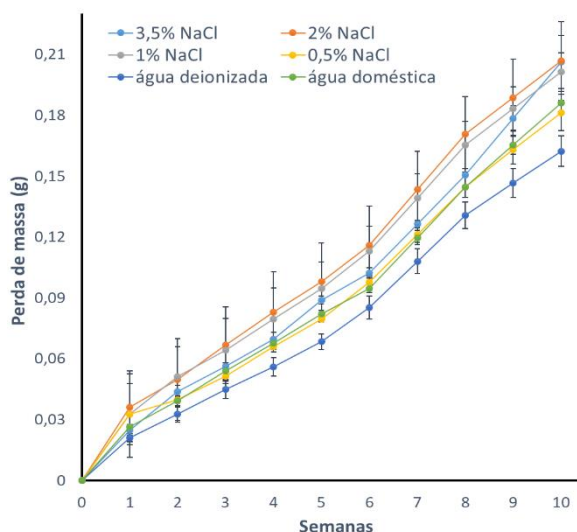
Avaliando os efeitos da concentração de NaCl na solução, é possível alinhar os resultados com a teoria de Gentil (2011), em que a solubilidade do oxigênio decresce com o aumento das concentrações de cloreto de sódio, onde é apresentado que, para concentrações acima de 3% de NaCl, implica no decréscimo contínuo da corrosão devido à baixa solubilidade do O_2 . Justificando, assim, a queda na TPC de teores de 2% para 3,5% de NaCl.

Avaliando a TPC, pode-se afirmar que as taxas obtidas são consideradas moderadas, conforme Tabela 3, que apresenta as especificações na norma NACE SP0775-2013 (2013). Nessas condições, é necessário avaliar os projetos de aplicação do material quanto aos riscos de operação e manutenções, para definir se os valores de corrosividade são aceitos.

4.1 Cinética das Reações

O teor de NaCl e sais em solução tem influência direta no poder de corrosão do meio corrosivo sobre o aço. Assim, pode-se avaliar dessa forma através do gráfico da perda de massa (g) x tempo (semana), em que há correspondência entre a concentração de sais e a velocidade de corrosão, segundo Gráfico 2. Para tal estudo, foi levado em consideração o meio como um sistema homogêneo, sendo a área dos corpos de prova desprezível (Cotta *et al.*, 2020).

Gráfico 2 - Perda de massa (g) x tempo (semana) dos CP's .



Fonte: Autores (2022).

As curvas apresentadas no Gráfico 2 representa a velocidade típica de corrosão eletroquímica, onde a perda de espessura é uniforme e a área da superfície disponível para reação é constante, o produto da corrosão é inerte e a concentração do agente corrosivo é constante (Gomes, 2005 e Ostroski, 2019).

Usando das leis de integração de velocidades pode-se verificar a ordem global da reação. A equação pode ser usada para verificar se uma reação é de ordem zero, primeira ordem ou de segunda ordem e para determinar sua constante de velocidade, montando gráficos de m_t versus t , de $\ln m_t$ versus t e de $1/m_t$ versus t , respectivamente, onde m_0 é a massa do corpo de prova corroída no tempo zero e m_t é a massa do corpo de prova corroída no tempo t .

Pode-se definir a ordem de uma reação observando os valores do coeficiente de regressão (R^2) que mais se aproximam de 1. De posse da equação pode-se chegar as constantes de velocidade da reação de corrosão (k) pela constante de inclinação da reta. Portanto, com a verificação dos dados da Tabela 5, podemos definir que todas as reações apresentaram ser de ordem zero, devido a aproximação do R^2 a 1. Com análise das k é possível prever que há aumento da velocidade de corrosão com o acréscimo da quantidade de cloreto de sódio dissolvido (eletrólito) na solução.

Tabela 5 - Dados cinéticos da reação de corrosão.

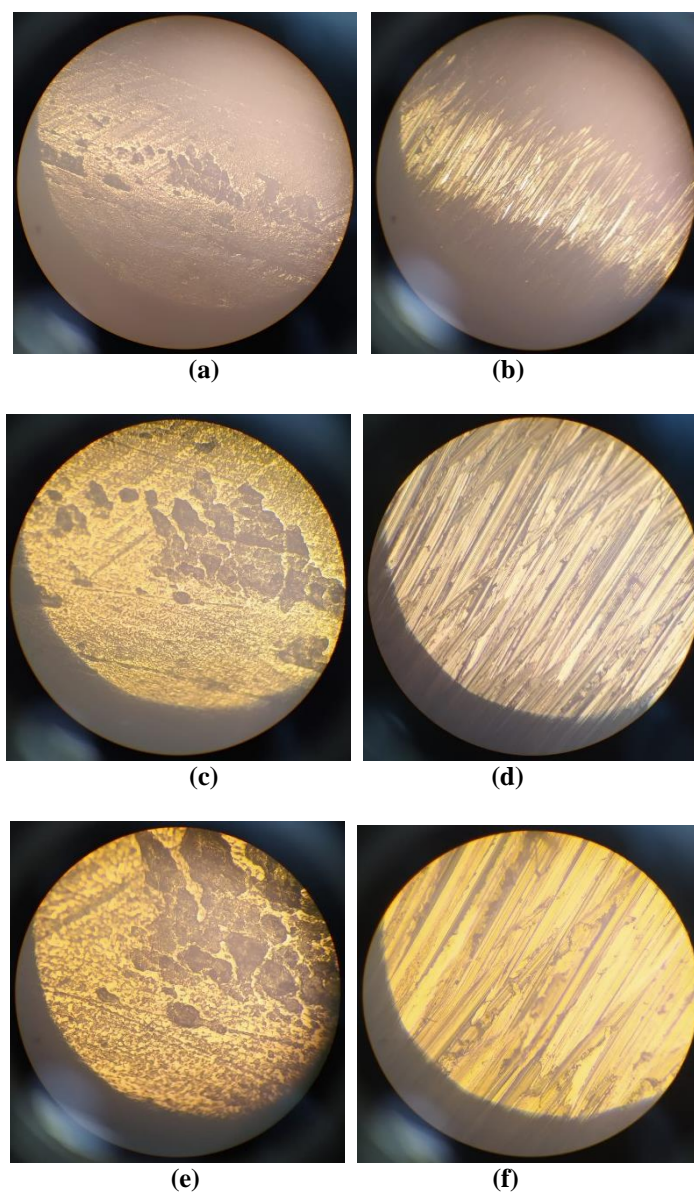
Meios corrosivos	Ordem Zero			1º ordem		2º ordem	
	R ²	Equação	k	R ²	Equação	R ²	Equação
NaCl 3,5%	0,981	0,0196x - 0,003	0,0196	0,7629	-3,1437x + 31,445	0,9643	0,2171x - 3,6274
NaCl 2%	0,9904	0,0196x + 0,0083	0,0196	0,8477	-2,2593x + 24,102	0,9748	0,1914x - 3,3482
NaCl 1%	0,9873	0,0188x + 0,0085	0,0188	0,8161	-2,395x + 25,311	0,9687	0,1933x - 3,3911
NaCl 0,5%	0,9769	0,0168x + 0,0045	0,0168	0,9016	-2,6985x + 28,848	0,9886	0,1971x - 3,5599
Água deionizada	0,9806	0,0159x - 0,0022	0,0159	0,8035	-3,886x + 38,829	0,971	0,2208x - 3,8557
Água de torneira	0,9844	0,0178x - 7E-05	0,0178	0,8167	-3,0784x + 31,546	0,9738	0,2086x - 3,6357

Fonte: Autores (2022).

4.2 Análise morfológica da corrosão

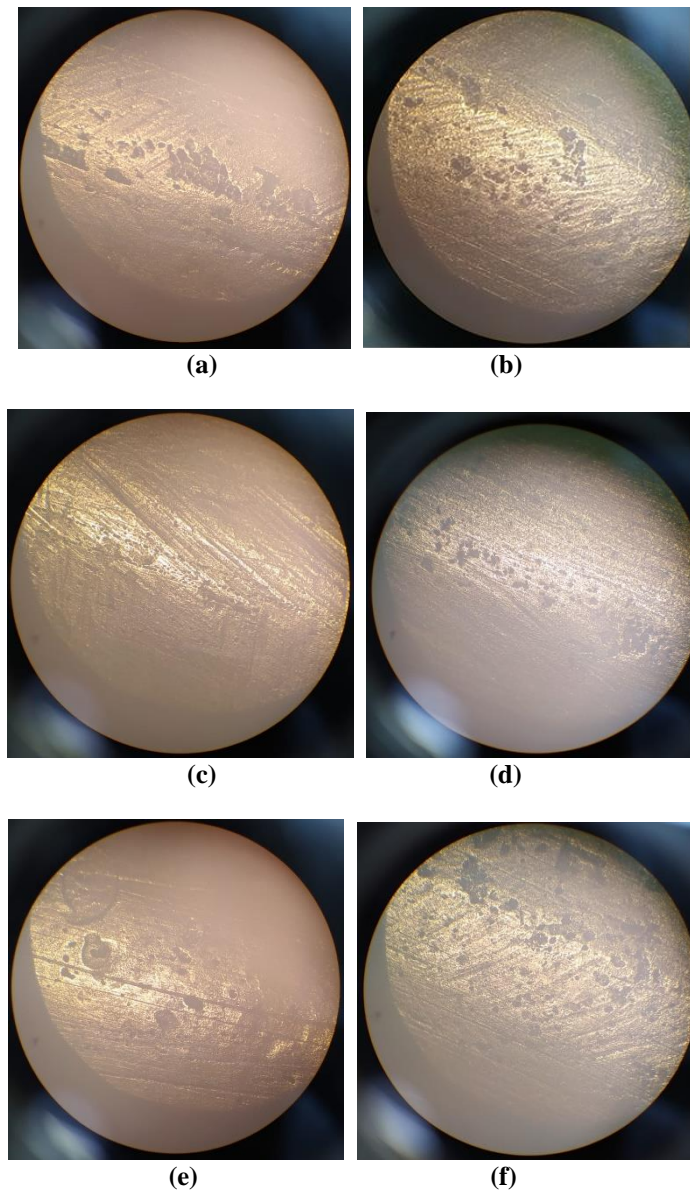
Com a finalidade de determinar e avaliar a morfologia da corrosão do aço, foi utilizado a técnica de microscopia óptica. A partir das imagens obtidas, foi observada a formação de corrosão superficial em todos os CP's, conforme observado nas Figuras 3(a, c e e), CP imerso na solução de NaCl 3,5%. A nível de comparação foi realizada a microscopia de um corpo de prova padrão, que passou pelo mesmo método de retirada da superfície oxidada durante o processo produtivo, porém sem contato direto com soluções eletrolíticas, Figuras 3 (b, d e f).

Figura 3 - (a) Morfologia de corrosão no CP na solução de NaCl 3,5%, (a), (c) e (e) aumento 100x, 200x e 500x, respectivamente; (b), (d) e (f) CP padrão 100x, 200x e 500x, respectivamente.



Fonte: Autores (2022).

Figura 4 - (a) Morfologia de corrosão no CP na solução de (a) NaCl 3,5%, (b) NaCl 2,0%, (c) NaCl 1,0%, (d) NaCl 0,5%, (e) água deionizada, (f) água de torneira, aumento 100x.



Fonte: Autores (2022).

Com base na observação das imagens obtidas no microscópio metalográfico, é possível verificar inicialmente uma corrosão generalizada que retirou, em sua maioria, as marcas deixadas pela lixadeira durante o desbaste da camada de óxidos do fio-máquina, quando se compara CP padrão, Figura 3(b), com o CP imerso na solução de NaCl 3,5%, Figura 3(a). Em seguida, é verificada a formação de corrosão por pites e alveolar na superfície do aço, corroborando com Gentil (2011), que apresenta a corrosão mais comum em aços carbono a formação de pites ou alvéolos. Os demais registros das superfícies ampliadas encontram-se na Figura 4.

5. Considerações Finais

Neste trabalho, foi possível verificar o comportamento do aço SAE 5160 em soluções eletrolíticas de NaCl como meio corrosivo, comparado com soluções estabelecidas como padrão (água deionizada, isenta de íons).

Foi observado que os CP's que foram testados nas soluções eletrolíticas contendo 2% de NaCl apresentaram maior perda de massa após 10 semanas. Tratando-se da TPC, o comportamento foi igual para os meios corrosivos testados no ensaio de imersão, apresentando corrosividade moderada para o aço.

Contudo, os CP's imersos na solução 1% de NaCl teve seus resultados equivalentes aos CP's imerso em água de torneira (doméstica), perda de massa e com taxa de penetração por corrosão moderada, o que sugere que a concentração de sais dissolvidos na água doméstica atribui características corrosivas semelhantes à solução de NaCl 1%. Enquanto, a solução contendo água deionizada apresentou os menores valores referentes a efeitos da corrosão, mas com taxa de penetração por corrosão também moderada.

As afirmações anteriores indicam que o aumento da concentração de cloreto de sódio em solução aumenta a velocidade da corrosão do aço. Entretanto, esse aumento pode estar limitado a concentrações de NaCl até 3%, visto que avaliando os resultados das soluções com concentração de 3,5% e 2%, não há acréscimo da velocidade de corrosão. Esses resultados corroboram com a literatura sobre o tema, entretanto para trabalhos futuros sugere-se que seja realizado um trabalho experimental focado nos efeitos da limitação da concentração de NaCl no meio corrosivo.

Quanto à morfologia, em todos os CP's ocorreram corrosão por pite e alveolar na superfície das amostras de fio-máquina. Portanto, essas formações devem ser avaliadas com critério, devido à aplicação do aço para fabricação de molas, pois esses pequenos pontos podem tornar-se pontos de tensão, que facilitará o surgimento de trinca nestes locais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a bolsa concedida dentro do edital N° 01/2021 do programa de bolsas de produtividade em pesquisa (PQ) da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Referências

- American Society for Testing and Materials – ASTM International G31-72 (2004). *Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*. Pensilvânia: West Conshohocken. p. 95-101.
- Araujo, J. V. S., Silva, R. M. P., Viveiros, B. V., Milagre, M. X., Machado, C. S. C., & Costa, I. (2022). Compreendendo os mecanismos de corrosão de ligas de Al-Cu-Li: uma investigação através de técnicas eletroquímicas globais e locais. *Química Nova*, 45 (6), 680-689.
- ArcelorMittal Brasil (2019). *Guia do aço*. <https://brasil.arcelormittal.com/pdf/produtos-solucoes/catalogos/catalogo-guia-aco.pdf?asCatalogo=pdf>
- Belgo Bekaert Arames, 2016. *Soluções em arames para fixadores*. <https://www.belgobekaert.com.br/wp-content/uploads/2019/06/BB-086-16-FOLDER-FIXADORES-PAGINADO-v3.pdf>
- Callister Jr., W. D. (2008). *Ciência e Engenharia dos materiais: uma introdução*. (7a ed.): LTC.
- Chiaverini, V. (1996). *Aços e Ferros Fundidos*. (7a ed.): Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM).
- Cotta, J. A. de O., Gomes, B. M., Andrade, F. L. de S., Figueireido, G. C. N., de Souza, G. K. F., Linhares, Ícaro L., Gomes, J. D., Santos, J. M. B. dos, Gomes, L. A., Carmo, N. H. do, de Melo, P. E. S., Santos, P. H. F. dos, Carneiro, R. P. de C., & Torres, R. Q. Q. de F. (2020). Ensino-aprendizagem de cinética e eletroquímica com uso de atividades experimentais: estudo de caso no ensino superior. *Research, Society and Development*, 9(2), e23921970. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i2.1970>
- Dias, L. V., Sá, S. K. M., Freitas Filho, A., Santos, C. E., & Santana, I. J. (2018). *Efeitos da temperatura de revenimento na dureza e resistência do aço AISI 5160*. In: 73º Congresso Anual da ABM, 2125-2136. 10.5151/1516-392X-31858
- Fontana, M.G. (1986). *Corrosion Engineering*. (3a ed.): McGraw-Hill, p. 1-5.
- Gentil, V. (2007). *Corrosão*. (3a ed.): LTC - Livros Técnicos e Científicos.
- Gentil, V. (2011). *Corrosão*. (6a ed.): LTC - Livros Técnicos e Científicos.
- Gil, A. C. (1999). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. (5a ed.): Atlas.
- Gomes, A. C. T. (2005). *Análise da corrosão e da erosão-corrosão do aço carbono em meio com NaHCO₃ e CO₂*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, Setor de Tecnologia, UFPR. 137 p.

Gomes, G. M. de O., Vieira, P. de C., Guedes, F. N. de J., & Monnerat, C. S. (2019). Estudo do efeito corrosivo de cloreto e brometo em amostras de aço carbono e aço inox. *Research, Society and Development*, 8(5), e1685866. <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i5.866>

International Zinc Association (IZA). (2015). <https://www.zinc.org/>

International Standard Organization. (2020). BS EN ISO 8044:2020. *Corrosion of metals and alloys*.

Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. *Fundamentos de Metodologia Científica*. Atlas, 2011

Lima, F. de A., Carvalho, M. D. de, Martins, D. S., Oliveira, A. S., Silveira, D. M., Siqueira, A. M. de O., & Bellido, J. D. A. (2020). Avaliação da resistência à corrosão em chapas de aço-carbono protegidas por revestimentos nanocerâmicos a base de zircônio e titânio. *Research, Society and Development*, 9(3), e183932715. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2715>

Mattar, F. N. *Pesquisa de marketing*. (3a ed.): Atlas, 2001.

NACE SP0775-2013. (2013). *Standard practice: preparation, installation, analysis and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations*. Houston: NACE International.

Ostroski, V. C. (2019). Avaliação da velocidade de corrosão nos equipamentos portuários. *Revista de Gestão & Sustentabilidade Ambiental*. 8 (1), 848-880.

Prodanov, C. C., & Freitas, E. C. (2013). *Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico*. Novo Hamburgo: FEEVALE.

Quattrocchi, D. G. S., Santoro, A. S., Fonseca, T. N. M., Conceição Júnior, V., Paes, L. W. C., & Campos, V. R. (2022). Técnicas experimentais e teóricas aplicadas ao estudo de inibidores orgânicos de corrosão em meio ácido. *Research, Society and Development*, 11(9), e57811932321. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32321>

Silva, A. C., & Mei, P. R. (2006). *Aços e ligas especiais*. Edgard Blucher.

Silva, R. C. (2021). *Estudo da corrosão em tubulações de aço-carbono utilizada na distribuição de água potável em solução de hipoclorito de sódio*. Dissertação (Mestrado em Ciências). Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais. Universidade de São Paulo. 101 p.