

Corrosão ácida do ferro fundido cinzento e do aço visando a produção de hidrogênio

Acid corrosion of gray cast iron and steel for the hydrogen production

Corrosión ácida de la fundición gris y del acero para la producción de hidrógeno

Recebido: 16/02/2022 | Revisado: 23/02/2022 | Aceito: 07/03/2022 | Publicado: 13/03/2022

Pâmela Oliveira Bernardo Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0148-2983>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: engepamella@gmail.com

Tatiane Carvalho Maeda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3892-2417>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: tatianemaeda@hotmail.com

Alexandre de Faria Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8881-6199>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: alexandre.lima@uftm.edu.br

Geoffroy Roger Pointer Malpass

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0036-5750>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: geoffroy.malpass@uftm.edu.br

Sandra Cristina Dantas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4775-040X>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: Sandra.dantas@uftm.edu.br

Resumo

As ligas metálicas são os produtos mais utilizados nas tarefas do dia-a-dia, sendo que diariamente são descartados milhares de toneladas no meio ambiente. Pelo estudo de processos de corrosão de metais, é possível propor aplicações para materiais metálicos inutilizados, empregando-se oxidação em meio ácido, e gerando-se hidrogênio. Com isso, o objetivo desse trabalho é avaliar a corrosão ácida de metais, reaproveitados, para a produção de hidrogênio. A metodologia utilizada foi a corrosão realizada com aço e ferro fundido cinzento, provenientes de sucatas automotivas, variando-se e combinando-se o material metálico, os tipos de ácidos (Sulfúrico e Clorídrico) e o tempo de reação, construindo-se a curva de corrosão do material. Para a quantificação dos teores de Fe, foi empregada a espectrometria de absorção atômica com chama. Nos resultados foi apresentada a influência de ácidos e metais, com propriedades e composições químicas distintas, na velocidade de corrosão e consequentemente na perda de material. Foram justificados com base na literatura, os possíveis fatores que são significativos na reação que fizeram com que ocorressem comportamentos inesperados nos resultados, como a maior perda de massa do metal quando imerso em ácido com menor molaridade. Como considerações finais, verificou-se que é possível prosseguir com pesquisas que visem a produção de hidrogênio a partir da corrosão de metais residuais, de forma a minimizar problemas ambientais, gerando uma nova fonte de energia.

Palavras-chave: Velocidade de corrosão; Método gravimétrico; Ácido clorídrico; Ácido sulfúrico.

Abstract

Metal alloys are the most used products in day-to-day tasks, and thousands of tons are discarded into the environment daily. By studying metal corrosion processes, it is possible to propose applications for unused metallic materials, using oxidation in an acid medium, and generating hydrogen. With this, the objective of this work is to evaluate the acid corrosion of metals, reused, for the production of hydrogen. The methodology used was corrosion carried out with steel and gray cast iron, from automotive scrap, varying and combining the metallic material, the types of acids (Sulfuric and Hydrochloric) and the reaction time, building the curve of material corrosion. To quantify Fe levels, flame atomic absorption spectrometry was used. The results showed the influence of acids and metals, with different properties and chemical compositions, on the corrosion rate and consequently on the loss of material. Based on the literature, the possible factors that are significant in the reaction that caused unexpected behaviors to occur in the results, such as the greater loss of mass of the metal when immersed in acid with lower molarity, were justified. As final considerations, it was found that it is possible to proceed with research aimed at the production of hydrogen from the corrosion of residual metals, in order to minimize environmental problems, generating a new source of energy.

Keywords: Corrosion speed; Gravimetric method; Hydrochloric acid; Sulfuric acid.

Resumen

Las aleaciones metálicas son los productos más utilizados en las tareas del día a día, y diariamente se desechan miles de toneladas al medio ambiente. Mediante el estudio de los procesos de corrosión de los metales, es posible proponer aplicaciones para materiales metálicos en desuso, utilizando la oxidación en medio ácido y generando hidrógeno. Con esto, el objetivo de este trabajo es evaluar la corrosión ácida de metales, reutilizados, para la producción de hidrógeno. La metodología utilizada fue la corrosión realizada con acero y fundición gris, a partir de chatarra automotriz, variando y combinando el material metálico, los tipos de ácidos (Sulfúrico y Clorhídrico) y el tiempo de reacción, construyendo la curva de corrosión del material. Para cuantificar los niveles de Fe se utilizó espectrometría de absorción atómica de llama. Los resultados mostraron la influencia de ácidos y metales, con diferentes propiedades y composiciones químicas, sobre la velocidad de corrosión y consecuentemente sobre la pérdida de material. Con base en la literatura, se justificaron los posibles factores significativos en la reacción que provocaron comportamientos inesperados en los resultados, como la mayor pérdida de masa del metal al ser sumergido en ácido de menor molaridad. Como consideraciones finales, se encontró que es posible proceder con investigaciones encaminadas a la producción de hidrógeno a partir de la corrosión de metales residuales, con el fin de minimizar los problemas ambientales, generando una nueva fuente de energía.

Palabras clave: Velocidad de corrosión; Método gravimétrico; Ácido clorhídrico; Ácido sulfúrico.

1. Introdução

Atualmente a geração de qualquer tipo de combustível está associada à emissão de gases estufa e outros poluentes. Portanto existe a necessidade de se desenvolver pesquisas focadas em geração de energia limpa e com elevada eficiência, como por exemplo, o gás hidrogênio (Kong, et al., 2021; Dincer & Acar, 2014; Dincer, 2012). Essas pesquisas tornam possível a transformação dessas fontes renováveis em formas úteis de energia, como eletricidade, calor e combustíveis (Lu et al., 2020). Dessa maneira, a matriz energética mundial passa por modificações, de forma que está havendo a implantação de um modelo energético com foco em fontes de energias não convencionais sem emissão de gases poluentes, com economia e eficiência energética (Kochanek, 2021).

Uma das tecnologias de energia verde, considerada mais importante, é a produção de hidrogênio limpo a partir de recursos renováveis (Kuo et al., 2021). Portador de energia potencial, o hidrogênio pode ser utilizado para transporte, energia elétrica central e distribuída e outras aplicações (Reuß et al., 2021). O gás hidrogênio pode se formar pela reação química com ácidos como o clorídrico e o sulfúrico em contato com metais como o zinco, o alumínio, o ferro, entre outros (Coronel-García, et al., 2020; Liang, et al., 2016). Esse método consiste em uma reação de oxirredução, em que o hidrogênio é produzido no catodo e o metal é oxidado no anodo. O processo é vantajoso, pois a reação ocorre de forma espontânea e por isso não há necessidade de passagem de corrente elétrica (Maeda, et al., 2021). Os materiais metálicos são alguns dos produtos mais utilizados, sendo que diariamente são descartados milhares de toneladas no meio ambiente. A reciclagem destes é de extrema importância para o meio ambiente, sendo que podem ser reciclados muitas vezes sem perder suas características e qualidade (Oliveira, 2012).

Os metais ferrosos mais comuns são o aço e o ferro fundido. Esses metais são ligas de ferro e carbono, que podem ainda apresentar na sua composição elementos como fósforo, manganês, silício, cobre, enxofre, entre outros (Jin, et al., 2022). Tais metais estão sujeitos a todo o momento à corrosão, que é a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos (Xu, et al., 2020).

Quando o metal é colocado no meio ácido, acontece sobre o metal uma distribuição de áreas anódicas e catódicas, ocorrendo a corrosão deste. Nas áreas anódicas o metal se oxida e nas catódicas o íon hidrogênio, se reduz ocorrendo o desprendimento de gás hidrogênio. Esse processo pode ser exemplificado pela reação de oxirredução do ferro, quando submetido em um meio ácido, representado pela Equação 1 (Kumar & Himabindu, 2019; Gentil, 2012):



Essa reação representa o ataque de ferro metálico por ácidos não oxidantes, isto é, que não têm caráter oxidante na sua parte aniônica. Os metais tendem a ter baixa energia de ionização, o que resulta numa fácil formação catiônica, o que explica a sua rápida oxidação. A própria corrosão pode ser definida como o processo de deterioração do material, mais frequentemente associado a metais e processos químicos/eletroquímicos podem ocorrer em conjunto com efeitos mecânicos (Gentil, 2012; Fernandes, et al., 2019).

Desse modo, um método alternativo para a geração de hidrogênio, é a corrosão eletroquímica ácida, que pode ser realizada através da reutilização de resíduos de metais de oficinas. Neste trabalho, foi utilizado como material o ferro fundido cinzento e o aço, que possuem composições e estruturas diferentes, e dois tipos de ácido com diferentes molaridades, foi possível realizar um estudo variando e combinando o material ferroso, o ácido e o tempo de reação. Este estudo teve como objetivo verificar o comportamento com o tempo, do aço e do ferro fundido cinzento quando submetidos à corrosão ácida, utilizando ácido clorídrico e sulfúrico, ambos com distintas concentrações. Ocorrida a reação de corrosão, foi quantificada a massa de ferro perdida por meio de método gravimétrico e obtido a massa de hidrogênio formada através de dois testes diferentes, que se baseiam na pressão do gás hidrogênio formado. Na solução ácida resultado ao final do processo, foi realizada a quantificação do teor de Fe remanescente, empregando Espectrometria de Absorção Atômica com Chama.

2. Metodologia

Foi empregado um método de pesquisa laboratorial e quantitativo, baseado no fenômeno reacional (Pereira, et al., 2018).

2.1 Preparação das amostras

Para a realização dos experimentos foram confeccionadas peças de aproximadamente 1,5x1,5 cm, de ferro fundido cinzento obtido pelo corte de um disco de freio e de aço, obtido pelo corte da lataria de carro. As amostras foram lavadas com palha de aço e a parte da lataria foi polida, para que a tinta ainda restante fosse retirada. Já no laboratório lavaram-se os pedaços com água destilada e esses foram colocados por 10 minutos em uma estufa.

2.2 Soluções e Reagentes

Toda água utilizada nas etapas analíticas, desde a limpeza de matérias até o preparo de soluções, foi obtida pelo tratamento de osmose reversa e deionização utilizando o equipamento Gehaka-Master-System, Model OS 20LX, apresentando condutividade inferior a $0,03 \mu\text{S cm}^{-1}$.

A curva de calibração de ferro, foi preparada, partindo de solução referência estoque de 1000 mg L^{-1} em HNO_3 na concentração $0,3 \text{ mol L}^{-1}$ Titrisol® (Merck, Darmstadt, Alemanha).

As soluções de ácido clorídrico e ácido sulfúrico empregadas nos testes de corrosão, foram preparadas, partindo de reagentes com concentração em grau analítico do tipo PA-ACS, (Synth, Brasil).

2.3 Equipamentos utilizados

Para quantificação dos teores de ferro em solução, empregou-se um espectrômetro de absorção atômica com chama, marca Varia modelo Spectra AA 200 FS, empregando lâmpada de cátodo oco (HCL) com filamento de ferro, com intensidade ajustada para 8 mA, resolução espectral (fenda) de 0,2 nm, comprimento de onda de 248,3 nm e curva de calibração variando entre 0,0 e 20 mg.L^{-1} .

2.4 Experimentos de corrosão

Preparou-se soluções de HCl e H₂SO₄, ambas em duas concentrações distintas, 0,5 e 1,0 mol.L⁻¹. Cada corpo de prova, foi previamente tarado e na seqüência colocado em um béquer contendo 20 mL de cada solução citada anteriormente, totalizando 8 experimentos, que foram realizados em triplicata. Manteve-se as peças metálicas imersas nas soluções ácidas por 10 minutos. Após esse período as peças foram retiradas das soluções e enxaguadas abundantemente com água deionizada. Sequencialmente, as peças foram destinadas em estufa a 110 °C por 10 minutos, para secagem do material.

Após a secagem do material, realizou-se nova pesagem das peças para acompanhar a perda de massa, pelo processo de corrosão. Logo após a última aferição da massa, repetiu-se novamente toda a etapa de imersão das peças em ácido, por mais 7 vezes, com o objetivo de obter uma curva de corrosão do material.

Ao final da etapa do tratamento, foi reservada uma quantidade de cada solução ácida, para a quantificação dos teores de Fe, empregando espectrometria de absorção atômica com chama.

3. Resultados e Discussão

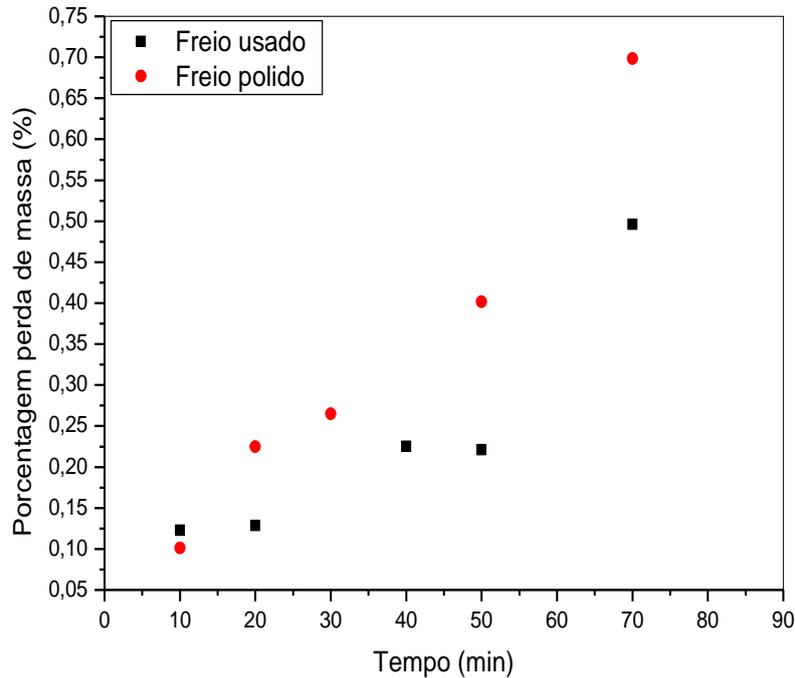
Como as peças dos materiais utilizados possuíam valores diferentes de massa inicial, não é possível comparar a perda de massa destes de forma correta. Assim, fez-se inicialmente um cálculo da porcentagem de massa perdida com o tempo para cada experimento realizado. Essa porcentagem de massa perdida foi obtida de acordo com a Equação 2:

$$\left[1 - \frac{\text{massa final}}{\text{massa inicial}} \right] * 100 \quad (2)$$

Para um estudo inicial de comparação da perda de massa em relação aos pedaços que já haviam sido colocados em ácido, selecionaram-se as peças de discos de freio e realizou o polimento dos corpos de prova para imersão no meio corrosivo novamente. Estes resultados são apresentados graficamente na Figura 1. Observa-se que o freio polido tem maior perda de massa que o freio não polido que já foi usado em experimentos anteriores, porém, inicialmente a perda de massa é praticamente a mesma. O comportamento discrepante dos resultados obtidos para o freio não polido pode ser explicado pelo fato de que, se um metal for retirado de um ácido com uma determinada concentração e colocado no mesmo ácido só que com uma concentração diferente, ele poderá não ser mais atacado, diz-se que o metal está no estado passivo (Gentil, 2012).

A passividade é causada por um filme muito fino de óxido na superfície metálica ou por um estado oxidado da superfície, que impede o contato entre o metal e o meio corrosivo. Admite-se ainda, a possibilidade de ocorrer a passivação por causa de oxigênio, íons ou moléculas, adsorvidas na superfície metálica. Esta pode ser destruída por substâncias redutoras, ou por um leve choque para destruir a película, como por exemplo, no jateamento abrasivo, ou seja, o polimento do metal (Gentil, 2012; Sato, 1990). A maior perda de massa obtida para o freio polido é esperada, pois quando ocorre a limpeza de um material usando um jateamento abrasivo, retiram-se todas as impurezas e camadas protetoras que poderiam existir, podendo criar também, lacunas que favorecerão a corrosão, com isso, o metal fica mais sujeito ao ataque ácido, assim a velocidade de corrosão será maior.

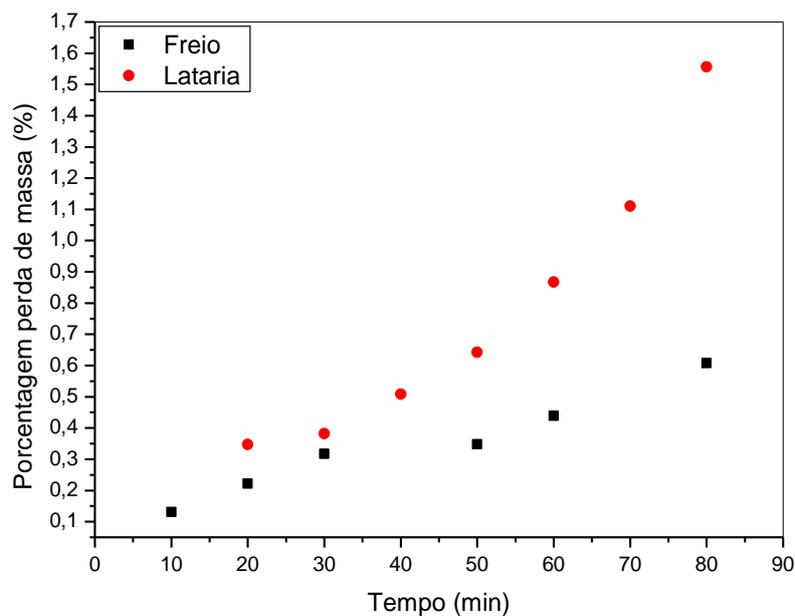
Figura 1 - Comparação da porcentagem de perda de massa para freio irregular usado e freio irregular polido, imersos em HCl 1,0 mol/L.



Fonte: Autores (2022).

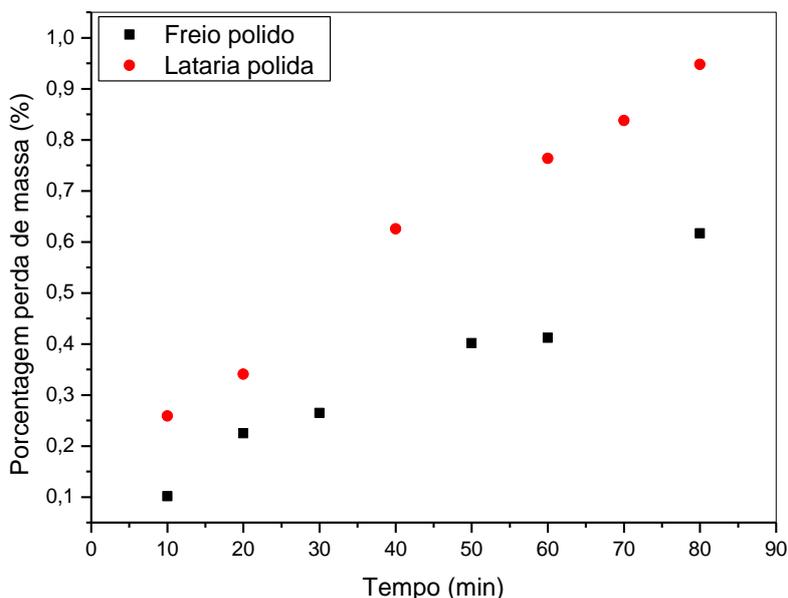
As Figuras 2 e 3 comparam a porcentagem de perda de massa do freio e lataria, imersos em HCl 0,5 e 1,0 mol/L. Observa-se que em ambos, a maior perda de massa é obtida para a lataria, ou seja, o aço apresenta maior perda de massa do que o ferro fundido quando submetidos à corrosão ácida usando ácido clorídrico.

Figura 2 - Comparação da porcentagem de perda de massa para freio irregular e lataria novos, imersos em HCl 0,5 mol/L.



Fonte: Autores (2022).

Figura 3 - Comparação da porcentagem de perda de massa para freio irregular polido e lataria polida novamente, imersos em HCl 1,0 mol/L.



Fonte: Autores (2022).

Observa-se que na Figura 3 a diferença de perda de massa segue de forma quase constante e na Figura 2 a diferença dos valores de perda de massa para o freio e lataria, tendem a aumentar com o tempo, sendo no último ponto bem maior em relação ao primeiro, ou seja, apresentam comportamentos divergentes, com o tempo.

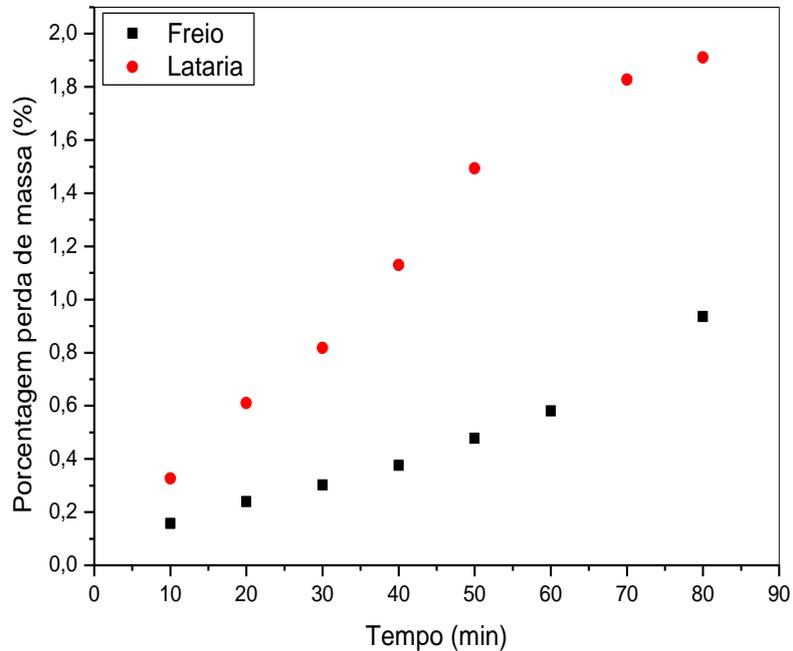
Levando em conta a composição química do disco de freio e lataria, não se pode afirmar quais são os compostos presentes e nem suas porcentagens em liga, pois cada fabricante automobilístico leva em conta uma determinada composição, que não pode ser revelada. O disco de freio por sofrer um maior desgaste devido à frenagem, como citado anteriormente, é composto sempre por elementos de liga como Si e Cr, que são adicionados visando uma menor corrosão (Labiapari, et al., 2019). Quanto à lataria, por ser revestida por uma camada de tinta, ou seja, por conter inibidores de corrosão, pode ou não apresentar esses elementos. Como a camada protetora, a tinta, foi retirada por polimento, o aço ficou desprotegido, enquanto que os elementos de liga presentes no disco de freio continuaram influenciando a inibição da corrosão do disco de freio. Além disso, os discos de freio não devem apresentar corrosão elevada, pois este fenômeno pode influenciar na eficiência de frenagem, ruído de freio e desgaste do disco e pastilha de freio, essa resistência ao desgaste e a corrosão é influenciada pela presença de cromo (Serbino, 2005). Assim, a maior corrosão da lataria para o ácido clorídrico de diferentes concentrações, pode ser justificada.

Semelhante ao que foi feito para o ácido clorídrico, seguem os gráficos comparativos da porcentagem de perda de massa em relação ao tempo. De acordo com a Figura 4 e a Figura 5, pode-se analisar a porcentagem de perda de massa para a lataria e freio imersos em ácido sulfúrico 0,5 e 1,0 mol/L, respectivamente. Observa-se que em ambos a maior perda de massa é obtida para a lataria, ou seja, o aço apresenta maior perda de massa do que o ferro fundido quando submetidos à corrosão ácida utilizando ácido sulfúrico. Em razão dos dados dessas figuras, para a lataria e freio, apresentarem comportamentos curvos opostos ao longo do tempo, não convém uma análise comparativa de tempos em tempos, pois por apresentarem comportamentos distintos, a cada tempo há uma maior aproximação ou distanciamento do valor da perda de massa para ambos.

A maior perda de massa para a lataria também foi obtida quando submetida à corrosão ácida, usando como meio corrosivo o ácido sulfúrico. Portanto essa semelhança de comportamento valida a justificativa dada anteriormente, indicando que a composição dos materiais utilizados influencia na corrosão dos mesmos. Além disso, convém destacar que existe uma

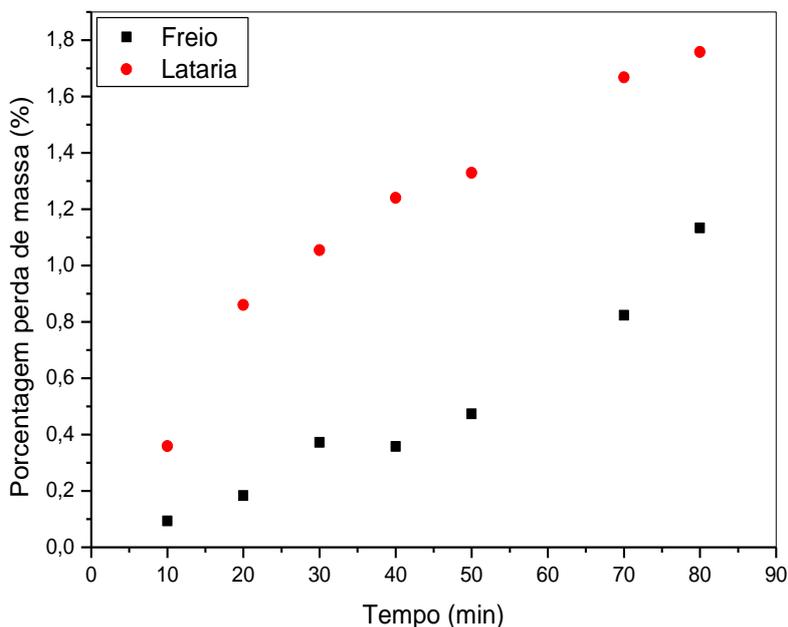
diferença na estrutura interna dos materiais, devido aos diferentes arranjos estruturais, e também a quantidade de vazios internos, ou lacunas, que cada um possui, tais diferenças podem influenciar na velocidade de corrosão e com isso, na perda de massa de cada material.

Figura 4 - Comparação da porcentagem de perda de massa para freio irregular e lataria novos, imersos em H_2SO_4 0,5 mol/L.



Fonte: Autores (2022).

Figura 5 - Comparação da porcentagem de perda de massa para freio irregular reutilizado e lataria polida novamente, imersos em H_2SO_4 1,0 mol/L.



Fonte: Autores (2022).

Fazendo uma comparação do comportamento do freio e da lataria imersos em ácido clorídrico e sulfúrico nas duas concentrações usadas no experimento, nota-se que o freio quando imerso em qualquer um dos ácidos independente da concentração, apresenta praticamente a mesma perda de massa até o tempo de 30 minutos, e só a partir do tempo 50 minutos essa diferença começa a ser significativa para os diferentes ácidos.

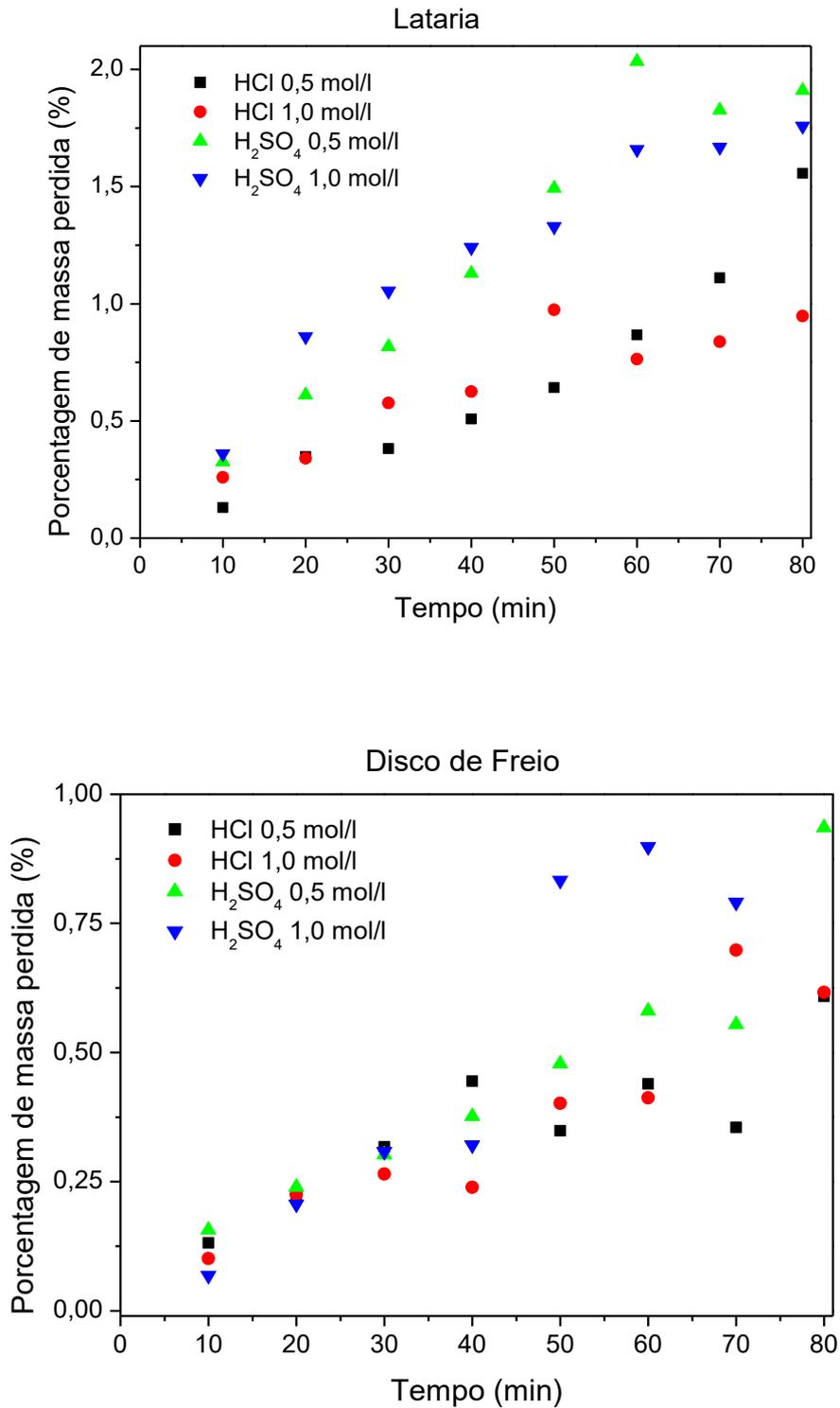
Já a lataria, apresenta uma maior diferença nos valores, quando se comparam as perdas de massa para os diferentes ácidos. A maior perda de massa ocorre quando o material foi imerso em ácido sulfúrico, indicando que este tem um maior potencial de corrosão nos materiais usados no experimento, quando comparado com o ácido clorídrico.

São apresentadas nas Figuras 6 e 7 o comportamento reacional de cada ácido em suas diferentes concentrações, avaliando a taxa de corrosão pela perda de massa dos corpos de prova e a avaliação do teor de ferro desprendido para a solução.

Observa-se que a lataria, apresenta uma maior diferença nos valores, quando se comparam as perdas de massa para os diferentes ácidos. A maior perda de massa ocorre quando o material foi imerso em ácido sulfúrico, indicando que este tem um maior potencial de corrosão nos materiais usados no experimento, quando comparado com o ácido clorídrico. Nota-se também que ocorre uma variação da maior perda de massa em pontos aleatórios para o ácido na maior e menor concentração, sendo que a porcentagem de perda é bem próxima para ambas as concentrações. Devido ao comportamento dos dados obtidos para o freio irregular, não se pode afirmar que ocorreu a passivação neste caso como ocorreu para a lataria, pois a perda de massa é praticamente a mesma em todos os tempos independente da concentração do ácido.

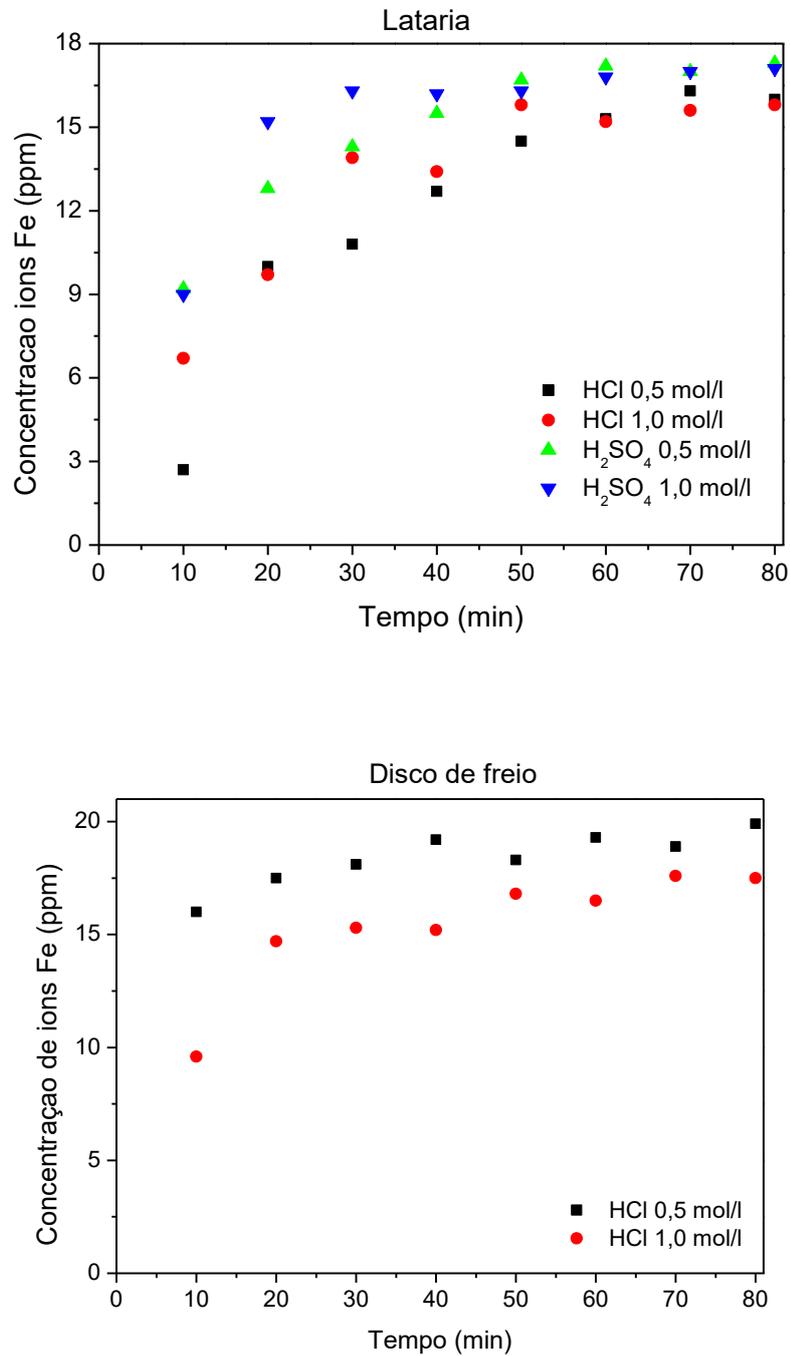
No que diz respeito à força dos ácidos, ambos são considerados ácidos fortes. Portanto, o maior potencial de corrosão observado para o ácido sulfúrico pode ser explicado pelo ciclo de regeneração ácida. Ou seja, se o íon $(SO_4)^{2-}$ não for removido gradualmente por lixiviação, por retirada do produto de corrosão ou por formação do sulfato básico de ferro insolúvel, o processo pode se tornar cíclico, pois o ácido sulfúrico, recuperado nas reações de hidrólise, retorna ao processo corrosivo formando uma infinita quantidade de produto de corrosão. Este mecanismo é chamado de ciclo de regeneração ácida (Gentil, 2012).

Figura 6 - Estudo de perda massa nos corpos de prova (Lataria e Disco Freio).



Fonte: Autores (2022).

Figura 7 - Estudo de liberação de Ferro para o meio ácido (Lataria e Disco Freio).



Fonte: Autores (2022).

De acordo com Gentil (2012), observa-se que, experimentalmente, alguns metais podem apresentar comportamento diferente do que seria previsto pelas suas posições na tabela de potenciais. Assim, o ferro pode ser rapidamente atacado por um ácido diluído, mas não é pelo concentrado, como observado pelo autor no caso do HNO₃. Quando isso ocorre, diz-se que o metal está no estado passivo. Nas condições em que o material se torna passivo, seu comportamento eletroquímico revela um potencial mais nobre, isto é, menos ativo que o normalmente apresentado. O material sofre então corrosão mais lenta.

No caso da lataria imersa em ambos os ácidos (Figura 6), a maior perda de massa até o tempo de 40 minutos ocorre quando imersa no ácido com a menor concentração, a partir desse tempo, ocorre uma inversão do comportamento, ou seja, a maior perda de massa é verificada na reação de corrosão usando o ácido menos concentrado. Como citado anteriormente, essa diferença não é muito significativa, indicando que a perda de massa independe da concentração de ambos os ácidos, quando comparados separadamente. Assim, visando uma maior economia para a produção do hidrogênio, deve-se utilizar o ácido menos concentrado, visto que a perda de massa e a consequente geração do hidrogênio como produto é independente da concentração dos dois ácidos utilizados no experimento.

O comportamento gráfico dos valores de concentração de íons ferro em relação ao tempo, representados pela Figura 7, obtidos por FAAS é semelhante, pois todos apresentam um comportamento curvo, indicando que a velocidade é inversamente proporcional à quantidade do produto de corrosão formado, ou seja, o teor de íons Fe proveniente do processo de oxidação permaneceram em sua maioria na forma de espécies insolúveis; Assim, estes íons que são desprendidos com o tempo podem ficar depositados na superfície metálica ou se depositarem no fundo do recipiente. Verifica-se que, de acordo com os dois últimos pontos, a concentração de íons tende a uma estabilidade. Levando em conta a cinética de reação, pode-se dizer que no início a concentração do reagente é maior, favorecendo uma maior velocidade de reação, e com o tempo o reagente é consumido para que ocorra a reação de corrosão, isso faz com que a concentração deste diminua com o tempo. Além disso, percebe-se que há uma maior distância entre o valor do primeiro ponto e os demais, tal fato pode ser justificado pela existência de alguma camada protetora presente no material que deve ser destruída para que a reação ocorra de maneira eficiente, assim, foi necessário um tempo de aproximadamente 20 minutos para eliminação da proteção, a partir deste tempo, a concentração de íons ferro passa a ter uma menor diferença em relação ao próximo ponto.

4. Considerações Finais

A parte experimental, incluindo os métodos utilizados para a quantificação da massa de material perdida e dos íons ferro em solução, foram de fácil realização, porém foi necessário um estudo aprofundado na área de corrosão para justificar os dados e os comportamentos gráficos obtidos.

O objetivo do trabalho foi atingido, visto que, foi possível fazer um estudo variando e combinando material ferroso, ácido e tempo, verificando a cada experimento como o tempo de imersão, molaridade e as diferentes características desses metais e dos ácidos interferem no comportamento da velocidade de corrosão e na perda de material.

A partir da análise e discussão dos resultados verificou-se a existência de fatores que influenciam o processo de corrosão, acelerando ou retardando o mesmo, e com fundamentos literários foi possível explicar como esses fatores interferem na reação de corrosão. Por conta desses fatores, a quantificação do hidrogênio produzido, que era inicialmente o objetivo principal, tornou-se secundário, pois durante estudos percebeu-se que a reação é muito mais complexa e envolve diversas questões que devem ser estudadas e entendidas primeiramente. Assim, esses fatores como passivação, a presença de elementos que retardam a corrosão, o comportamento corrosivo cíclico de um dos ácidos usados no experimento, a formação de produtos de corrosão com alto peso molecular e a adsorção de hidrogênio foram privilegiadamente estudados, para que fosse possível comparar e justificar os resultados obtidos, até mesmo os inesperados.

Com base no que foi abordado, conclui-se que para que seja possível prosseguir com áreas de pesquisas que visam o aprimoramento ou descobrimento de novas tecnologias, a fim de minimizar problemas ambientais, como a produção de hidrogênio como fonte de energia, o estudo da corrosão e das características dos materiais utilizados, é de extrema importância para que haja um entendimento dos fatores que os englobam.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria utilizar a metodologia empregada nesse trabalho de se construir a curva de corrosão do material para outros ácidos ou outras fontes de metais que seriam descartados também, como alumínio, que é

resíduo de vidraçarias, por exemplo.

Agradecimentos

À Labfert Análises LTDA, pelo suporte técnico nas análises e fornecimento de insumos para realização deste trabalho.

Referências

- Coronel-García, M. A., Salazar-Barrera, J. G., Malpica-Maldonado, J. J., Martínez-Salazar, A. L., & Melo-Banda, J. A. (2020). Hydrogen production by aluminum corrosion in aqueous hydrochloric acid solution promoted by sodium molybdate dihydrate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(26), 13693–13701. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.122>
- Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954–1971. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
- Dincer, I., & Acar, C. (2014). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- Fernandes, D. M., Squissato, A. L., Lima, A. F., Richter, E. M., & Munoz, R. A. A. (2019). Corrosive character of Moringa oleifera Lam biodiesel exposed to carbon steel under simulated storage conditions. *Renewable Energy*, 139, 1263–1271. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.034>
- Gentil, V. (2012). *Corrosão*. LTC (6a ed.).
- Jin, Z.; Xiong, C.; Zhao, T.; Du, Y.; Zhang, X.; Li, N.; Yu, Y. & Wang, P. (2022) Passivation and depassivation properties of Cr–Mo alloyed corrosion-resistant steel in simulated concrete pore solution. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104375. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104375>
- Kochanek, E. (2021). The Energy Transition in the Visegrad Group Countries, *Energies*, 14, 2212. <https://doi.org/10.3390/en14082212>
- Kong, L.; Li, L.; Liu, C.; Ma, P.; Bian, Y. & Ma, T. (2021). Techno-economic analysis of hydrogen energy for renewable energy power smoothing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 2847-2861.
- Kuo, P. C., Illathukandy, B., Wu, W., & Chang, J. S. (2021). Energy, exergy, and environmental analyses of renewable hydrogen production through plasma gasification of microalgal biomass. *Energy*, 223, 120025. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120025>
- Labiapari, W. S., Ardila, M. A. N., Binder, C., Costa, H. L., & de Mello, J. D. B. (2019). Mechanical effects on the corrosion resistance of ferritic stainless steels during microabrasion-corrosion. *Wear*, 426–427, 1474–1481. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.057>
- Liang, J., Gao, L. J., Miao, N. N., Chai, Y. J., Wang, N., & Song, X. Q. (2016). Hydrogen generation by reaction of Al–M (M = Fe,Co,Ni) with water. *Energy*, 113, 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.013>
- Lu, Y., Khan, Z. A., Alvarez-Alvarado, M. S., Zhang, Y., Huang, Z., & Imran, M. (2020). A critical review of sustainable energy policies for the promotion of renewable energy sources. *Sustainability (Switzerland)*, 12(12), 1–30. <https://doi.org/10.3390/su12125078>.
- Maeda, T; Teixeira, L.; Caixeta, L.; Antonelli, R.; Pinto, C.;Dantas, S.; Silva, P.;Granato, A.;Fernandes, D.; Malpass, G. (2021). Feasibility of H₂ production by acid corrosion using H₂SiF₆ and waste Fe sources. *Química Nova*, 1–10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170778>.
- Oliveira, A. R. (2012). *Corrosão e Tratamento de Superfície*. Belém: Escola Técnica Aberta do Brasil IFPA, 104p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Corrosão).
- Pereira, A.S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. UFSM. https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1. Acesso em: 5 abril 2020.
- Reuß, M., Dimos, P., Aline, L., Grube, T., Robinius, M., & Stolten, D. (2021). Hydrogen Road Transport Analysis in the Energy System: A Case Study for Germany through 2050, *Energies*, 14, 3166. <https://doi.org/10.3390/en14113166>
- Sato, N. (1990). An overview on the passivity of metals. *Corrosion Science*, 31, 1-19, [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(90\)90086-K](https://doi.org/10.1016/0010-938X(90)90086-K).
- Serbino, E. M. (2005). *Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), São Paulo.
- Kumar S. S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- Xu, X., Liu, S., Smith, K., Cui, Y., & Wang, Z. (2020). An overview on corrosion of iron and steel components in reclaimed water supply systems and the mechanisms involved. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 276). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124079>