



## AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS-LIGA AISI/SAE 4140, 4815, 4340 E 8620 SUBMETIDOS AO CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Sthefanie de C. M. Lopes<sup>1\*</sup>, Lucas M. de Souza<sup>1</sup>, Eline T. R. Medina<sup>1</sup>, Elaine C. Pereira<sup>1</sup>

*1 – Laboratório de Materiais Avançados, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UNF). Avenida Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes, CEP: 28013-602, RJ*

[sthefanie\\_carvalho@hotmail.com](mailto:sthefanie_carvalho@hotmail.com)

### RESUMO

*A corrosão é um problema crítico em todas as indústrias e estima-se que, como resultado das reações de corrosão, sejam gastos 5% das receitas de uma nação industrializada, devido a necessidade de manutenção ou substituição de equipamentos perdidos ou contaminados e na prevenção da corrosão. A indústria sucroalcooleira está amplamente sujeita à fenômenos de corrosão, pois a composição do caldo favorece a corrosão em diversos tipos de equipamentos. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a resistência à corrosão dos aços-liga em meio de caldo de cana-de-açúcar, a fim de estudar a viabilidade da utilização de materiais que combinem boa resistência mecânica e resistência à corrosão. Foram realizados ensaios de corrosão por imersão, em tempos e condições diferentes, com o objetivo de avaliar a influência das variáveis nas taxas de corrosão, que foram determinadas através da técnica de perda de massa descrita na norma ABNT NBR 6210. Foi realizada a caracterização microestrutural dos aços-liga, sendo possível explicar seu comportamento corrosivo e comprovar os tratamentos térmicos realizados, a partir da análise e observação das fases e constituintes presentes na amostra. Os resultados obtidos nos ensaios de corrosão mostraram a importância de sua realização com parâmetros bem definidos. Foi possível comprovar que a resistência à corrosão de um material está em função de sua microestrutura e composição química. A constante troca de fluido corrosivo interferiu nos resultados de taxa de corrosão, ocasionando a quebra da película protetora de óxido formada na superfície do material.*

**Palavras-chave:** taxa de corrosão, aço-liga, caldo de cana-de-açúcar

### INTRODUÇÃO

A corrosão é um problema crítico em todas as indústrias, resultando em elevados custos de reparo e de paradas operacionais. Estima-se que cerca de 30% da produção mundial de ferro e aço é perdida com a corrosão, e os custos correspondem de 1 a 5% do PIB dos países. Em 2019, o Brasil teve um gasto equivalente a 4% do PIB com manutenção da corrosão<sup>(1,2)</sup>.

O setor sucroalcooleiro é de grande importância para a sociedade, por conta do seu significativo papel na economia do país, sendo o Brasil o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o segundo maior produtor de etanol<sup>(3,4)</sup>. Esse segmento está amplamente sujeito à fenômenos de corrosão, pois a composição do caldo de cana-de-açúcar favorece a deterioração em diversos tipos de equipamentos. O aço com baixo teor de carbono e o ferro fundido são

muito utilizados como materiais de construção de máquinas e equipamentos nesse segmento, devido ao seu baixo custo. No entanto, possuem baixa resistência à corrosão nesse ambiente. Devido aos gastos com manutenção, substituição e reparo de equipamentos, existe a busca incessante por outros materiais que apresentem uma maior resistência<sup>(5-7)</sup>.

A maioria dos materiais metálicos interage com uma grande parcela de ambientes diferentes, comprometendo sua utilidade em determinada aplicação devido à deterioração de suas propriedades mecânicas, como ductilidade e resistência, propriedades físicas ou de sua aparência. Nos metais, a deterioração se apresenta na forma de uma efetiva perda de material, pela dissolução ou pela formação de uma incrustação em sua superfície<sup>(8)</sup>.

Os aços-liga são materiais que, após tratamentos térmicos, são capazes de apresentar uma boa resistência mecânica e dureza em combinação com ductilidade, tenacidade e resistência à corrosão. Além disso, possuem um custo reduzido quando comparados aos aços inoxidáveis<sup>(9)</sup>.

Este trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento corrosivo dos aços-liga AISI/SAE 4140, 4815, 4340 e 8620 em meio de caldo de cana-de-açúcar, relacionando esse resultado com sua microestrutura e variáveis de ensaio, para analisar a viabilidade da utilização dos aços mencionados na construção de equipamentos em indústria sucroalcooleira, visando a redução dos custos operacionais devidos à corrosão.

## MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram utilizados cupons de perda de massa dos quatro aços-liga distintos apresentados na tabela 1, que foram recebidos já tratados termicamente, por têmpera e revenido. A composição química comercial desses aços é apresentada na mesma tabela.

Tabela 1: Composição química comercial dos aços-liga analisados<sup>(10)</sup>. (% em peso)

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
<b>8620</b>	0,17 – 0,23	0,70 – 0,90	0,15 – 0,35	0,40 – 0,70	0,40 – 0,60	0,15 – 0,25
<b>4140</b>	0,38 – 0,43	0,75 – 1,00	0,15 – 0,35	-	0,80 – 1,10	0,15 – 0,25
<b>4815</b>	0,13 – 0,18	0,40 – 0,60	0,15 – 0,35	3,25 – 3,75	-	0,20 – 0,30
<b>4340</b>	0,38 – 0,43	0,60 – 0,80	0,15 – 0,35	1,65 – 2,00	0,70 – 0,90	0,20 – 0,30

Os cupons foram preparados metalograficamente de forma convencional, utilizando lixas de número 100, 220, 320, 400, 600, 1200. Posteriormente foram polidas com alumina de granulometria 0,3 e 1µm. A microestrutura do material foi revelada com Nital 2%. Para a análise microestrutural, foram utilizados os microscópios ótico GX41 e Confocal OLS4000, da marca OLYMPUS.

Para a análise da resistência à corrosão, foram realizados ensaios de corrosão por imersão em tempos de 24 e 48h em temperatura ambiente e sem troca de fluido. Em seguida, o ensaio foi realizado, de forma padronizada, nos tempos de 24, 48 e 120 horas, em ambiente refrigerado e com troca de fluido a cada 12 horas. As taxas de corrosão foram determinadas através da técnica de perda de massa descrita na norma ABNT NBR 6210<sup>(11)</sup>.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 (a), (b), e (c) é possível observar que os aços-liga 4140, 4340 e 8620, respectivamente, apresentaram microestruturas bastante semelhantes, com morfologia acicular distribuída de forma desordenada, característica da estrutura martensítica em formato de ripas, e áreas mais claras correspondentes à austenita retida que não se transformou durante o resfriamento rápido. O aço 8620 apresentou uma pequena quantidade de agulhas finas, com tonalidade mais escura, que podem corresponder à bainita, pois é descrito na literatura que no

segundo estágio do revenido, entre 200°C e 300°C, a austenita retida na matriz martensítica se transforma em bainita inferior<sup>(12)</sup>.

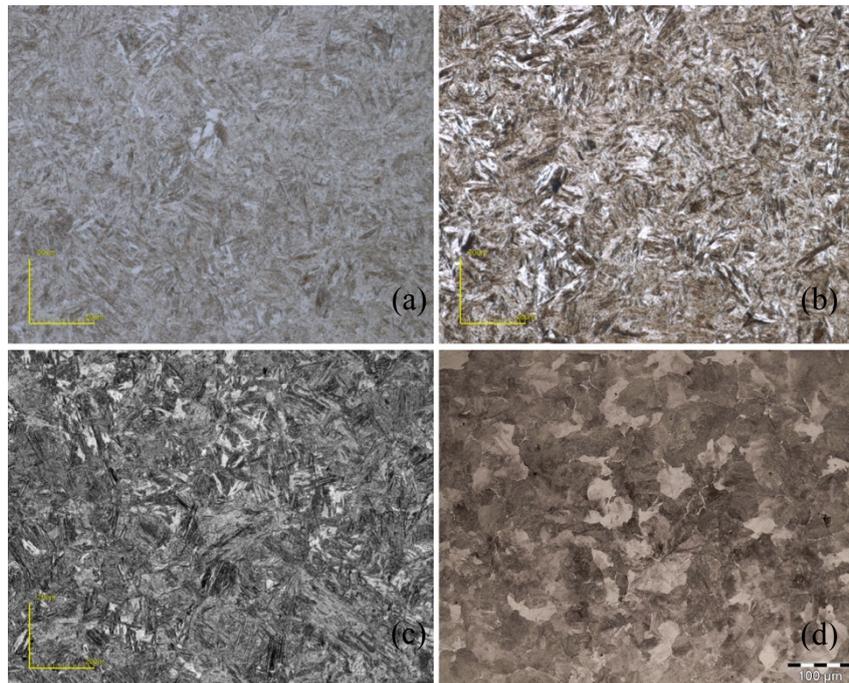


Figura 1: Microestrutura dos aços-liga (a) 4140, (b) 4340, (c) 8620 e (d) 4815. Microscopia confocal (a, b e c). Microscopia ótica (d)

Sabe-se que os quatro aços estudados foram tratados termicamente por têmpera e revenido, entretanto, o fabricante não forneceu informações a respeito dos parâmetros de tratamento utilizados. Considera-se que os tratamentos tenham sido realizados com uma mesma velocidade de resfriamento. Na microestrutura do aço 4815, mostrada na Figura 1 (d), observa-se uma microestrutura com uma região mais clara correspondente à ferrita proeutetóide e uma região mais escura correspondente às lamelas finas de ferrita alternadas com cementita, o que indica que houve a difusão do carbono durante o tratamento térmico. Acredita-se que a têmpera foi realizada de forma incompleta, no qual a velocidade de resfriamento não foi o suficiente para a obtenção da estrutura martensítica.

Na Figura 2 é mostrada uma comparação entre as taxas médias de corrosão nos ensaios de 24 e 48h sem padronização. Foi possível perceber que essas taxas de corrosão foram muito severas, principalmente no ensaio de 48 horas. Como não houve a troca do fluido nesses ensaios, o caldo ficou muito tempo exposto em temperatura ambiente e, de acordo com a literatura, o caldo de cana-de-açúcar *in natura* sofre deterioração de sabor e aparência após sua extração devido ao processo de fermentação, resultando em produtos ácidos de origem microbiana. Esses micro-organismos diminuem o pH do caldo, acelerando o processo corrosivo e resultando em altas taxas de corrosão<sup>(13)</sup>.

Na Figura 3 é feita uma comparação entre as taxas médias de corrosão, em mm/ano, obtidas nos ensaios padronizados. Analisando esses resultados, é possível observar que houve uma mesma tendência para a resistência à corrosão nos ensaios de 24h e 48h, seguindo a ordem decrescente de taxa de corrosão (24h; 48h): 4815 ( $0,3175 \pm 0,1034$ ;  $0,1763 \pm 0,0436$ ) > 4340 ( $0,2386 \pm 0,0151$ ;  $0,1510 \pm 0,0035$ ) > 4140 ( $0,2017 \pm 0,0741$ ;  $0,1317 \pm 0,0033$ ) > 8620 ( $0,1869 \pm 0,0526$ ;  $0,1084 \pm 0,0400$ ). O aço 4815 reagiu como o esperado nesses dois ensaios, pois este aço está mais suscetível à corrosão devido ao fato de que, entre os aços estudados, é o único que não possui cromo em sua composição química. O aço 4140 apresentou uma microestrutura

com grãos menores e mais uniformes, contando com a presença de mais contornos de grãos, que funcionam como regiões anódicas, que podem provocar uma tendência ao aumento da taxa de corrosão. Porém, esse aço possui uma porcentagem de cromo um pouco maior comparado ao aço 4340. O efeito da presença desse elemento provavelmente se sobrepôs aos efeitos negativos de sua microestrutura, fazendo com que apresentasse uma maior resistência à corrosão que o 4340. O 8620 apresentou as menores taxas devido à sua composição química, com uma combinação de níquel, cromo e molibdênio.

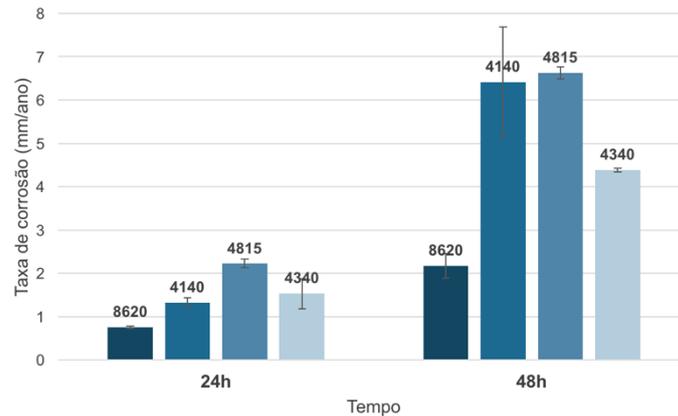


Figura 2: Comparação entre as taxas médias de corrosão entre os ensaios sem padronização nos tempos de 24 e 48 horas.

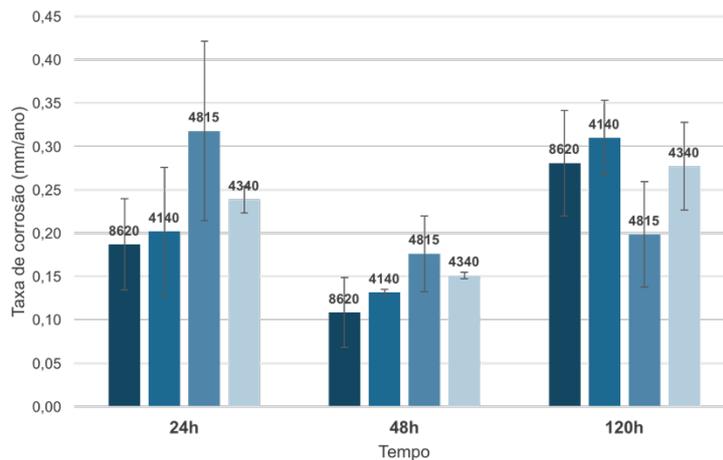


Figura 3: Comparação entre as taxas médias de corrosão obtidas nos ensaios padronizados nos três tempos de exposição.

Comparando os ensaios de 24 e 48 horas padronizados, de um modo geral, verificou-se uma tendência à diminuição dos valores médios de taxa de corrosão com o aumento do tempo de exposição. Segundo Finamore<sup>(14)</sup>, os valores tendem a ser mais elevados no início de um ensaio, e com o tempo há a formação de produtos de corrosão insolúveis e aderentes à superfície metálica que funcionam como uma barreira para a posterior oxidação.

No ensaio de 120h foi observado que os aços apresentaram um comportamento praticamente oposto ao descrito anteriormente nos ensaios de 24h e 48h, apresentando a seguinte ordem decrescente de taxa de corrosão: 4140 ( $0,3098 \pm 0,0428$ ) > 8620 ( $0,2807 \pm 0,0608$ ) > 4340 ( $0,2770 \pm 0,0504$ ) > 4815 ( $0,1987 \pm 0,0606$ ). No que se refere às taxas de corrosão, comparado aos ensaios de 24h e 48h, verificou-se uma tendência ao aumento acentuado dessas taxas, com exceção do aço 4815. É possível que esse aumento observado nos aços 4140, 4340 e 8620 seja devido ao fato que, com a troca constante do fluido corrosivo os

cupons foram mais expostos ao ar atmosférico, quando comparados aos dos outros ensaios. Mesmo que por pouco tempo, esse contato acarretou na quebra de suas películas protetoras por várias vezes, expondo o material à um novo ataque corrosivo, resultando em um aumento da taxa de corrosão. Apenas com os resultados obtidos nesse trabalho não foi possível um maior entendimento do comportamento observado, sendo necessária uma análise da composição química dos filmes de óxidos formados na superfície dos aços, para avaliar se o aço 4815 formou uma película mais resistente à quebra durante troca de fluido.

## CONCLUSÕES

A caracterização microestrutural dos materiais foi muito importante para que fosse possível explicar suas propriedades, comportamentos e comprovar os tratamentos térmicos realizados, a partir da análise e observação das fases e constituintes presentes na amostra. Com essa análise foi possível verificar que esses materiais sofreram tratamentos térmicos de têmpera e revenido à baixas temperaturas, apenas para alívio de tensões.

O aço 4815 apresentou zonas orientadas da fase ferrita e do constituinte perlita, o que indica que houve a difusão do carbono durante o tratamento térmico realizado. Acredita-se que a têmpera foi realizada de forma incompleta, no qual a velocidade de resfriamento não foi o suficiente para a obtenção da estrutura martensítica.

Verificou-se a extrema importância da realização dos ensaios de corrosão com parâmetros bem definidos. A combinação entre temperatura baixa e controlada e a troca de fluido a cada 12 horas, evitou que ocorresse o envelhecimento do caldo, resultando em menores taxas de corrosão.

A resistência à corrosão dos aços, observadas nos ensaios de 24h e 48h padronizados seguiu uma mesma tendência, em ordem decrescente de taxa de corrosão: 4815 > 4340 > 4140 > 8620, foi possível observar que este resultado está em função da composição química e da sua microestrutura. Com o aumento do tempo de ensaio para 120 horas, foram obtidas, em média, taxas de corrosão 1,40 vezes maiores que as obtidas no ensaio de 24 horas e 2,26 vezes maiores que no ensaio de 48 horas, devido à constante exposição dos cupons ao ar atmosférico nas trocas do fluido corrosivo, com exceção do aço 4815, o que indica que esse aço tenha formado uma película mais resistente, sendo necessária uma maior investigação de sua composição química.

Conclui-se que, analisando os resultados obtidos nesses ensaios, o aço 8620 foi o material que apresentou a melhor resistência à corrosão quando submetido ao caldo de cana-de-açúcar.

## AGRADECIMENTOS

À PETROENGE, por ceder as amostras utilizadas e pelo suporte financeiro concedido à esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

1. TELLES, P. C. S. Materiais para equipamentos de processo. 6. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
2. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Processo de corrosão faz com que 30% da produção mundial de ferro e aço seja desperdiçada. IBRAM - Mineração do Brasil, 2020. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/processo-de-corrosao-faz-com-que-30-da-producao-mundial-de-ferro-e-aco-seja-desperdicada/>>. Acesso em: 7 dezembro 2021.
3. NACHILUK, K. Alta na produção e nas exportações de açúcar marca a safra 2020/21 de cana. Análises e Indicadores do Agronegócio, São Paulo, v. 16, n. 6, junho 2021. 1-5.
4. VIDAL, M. F. Produção e mercado de etanol. Caderno Setorial ETENE, 6, n. 159, abril 2021. 1-11.

5. DURMOO, S. et al. Biocorrosion of stainless steel grade 304L (SS304L) in sugar cane juice. *Electrochimica Acta*, n. 54, 2008. 74-79.
6. WESLEY, S. B.; GOYAL, H. S.; MISHRA, S. C. Corrosion behavior of ferritic steel, austenitic steel and low carbon steel grades in sugarcane juice. *Journal of Materials & Metallurgical Engineering*, 2, n. 1, Abril 2012. 9-22.
7. SANTOS, L. J. C.; TENÓRIO, J. A. S. Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, 63, 2010. 179-184.
8. CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 882 p.
9. TOTTEN, G. E. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. Portland: CRC Press, 2006.
10. ASM HANDBOOK. *Properties and selection: irons, steels and high performance alloys*. 10. ed. ASM Internacional, v. 1, 1990.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6210 Corrosão atmosférica - Materiais metálicos - Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão. Rio de Janeiro. 2008.
12. CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1988.
13. KUNITAKE, M. T. *Processamento e estabilidade de caldo de cana acidificado*. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo. Pirassununga. 2012
14. FINAMORE, D. J. *Avaliação da corrosão uniforme e puntiforme em meio aquoso aerado utilizando a técnica de cupons de perda de massa*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes. 2016.

## **EVALUATION OF CORROSION RESISTANCE OF AISI/SAE 4140, 4815, 4340 AND 8620 ALLOY STEEL SUBMITTED TO SUGARCANE JUICE**

### **ABSTRACT**

*Corrosion is a critical problem in all industries and as a result of corrosion reactions, it is estimated that 5% of an industrialized nation's income is spent due to the need to maintain or replace lost or contaminated equipment and to prevent corrosion. The sugar-alcohol industry is widely subject to corrosion phenomena, as the composition of sugarcane juice favors corrosion in different types of equipment. This work aimed to evaluate the corrosion resistance of alloy steels in a sugarcane juice environment, in order to study the viability of using materials that combine good mechanical strength and corrosion resistance. Immersion corrosion tests were carried out at different times and under different conditions in order to evaluate the influence of the variables on the corrosion rates, which were determined using the mass loss method described in the ABNT NBR 6210 standard. The microstructural characterization of the alloy steels was carried out, making it possible to explain their corrosive behavior and prove the heat treatments performed, bases on the analysis and observation of the phases and constituents present in the sample. The results obtained in the corrosion tests showed the importance of performing it with well-defined parameters. It was possible to prove that the corrosion resistance of a material depends on its microstructure and chemical composition. The constant change of corrosive fluid interfered in the corrosion rate results, causing the breakdown of the protective oxide film formed on the surface of the material.*

**Keywords:** *corrosion rate, alloy steel, sugarcane juice*