



ESTUDO DA CORROSÃO DAS LIGAS Al-7%SiMg (A356) e Al-11%SiMg (A413) USADAS EM RODAS AUTOMOTIVAS

Palavras-Chave: Degradação por corrosão; Análise por imersão; Rodas de ligas leve.

Autores:

Sâmia Morato de Faria [UNICAMP]

Prof.^a Dr.^a Giovana da Silva Padilha (orientadora) [UNICAMP]

INTRODUÇÃO

A redução de emissões de poluentes é objetivo importante nas políticas internacionais, uma vez que isso afeta tanto a qualidade e o equilíbrio ambiental como também apresenta forte impacto na competitividade das empresas de diversos setores (MERLIN *et al.*, 2009). Na indústria automobilística isso não é diferente, o desenvolvimento de uma estrutura de veículo leve com a aplicação de materiais como liga de alumínio é uma forma eficaz de solucionar a crise energética e os problemas de poluição ambiental causados pelos automóveis (NA *et al.*, 2018). A baixa massa específica implica na substituição de estruturas tradicionais de aço dos veículos por materiais mais leves como alumínio, plásticos e compósitos. Isso levou o alumínio a ser o material mais usado para diminuição de massa, já que tem potencial de redução da massa total do veículo em 20-30% quando comparado ao aço (AROWOSOLA e GAUSTAD, 2019). Dessa forma, a redução de massa acarreta na melhora do desempenho do veículo, na diminuição do consumo de combustíveis e consequentemente na redução de emissão de gases poluentes como o dióxido de carbono (CO₂).

Além disso, o alumínio também apresenta outra importante característica que é a facilidade de combinar com outros elementos, o que aumenta significativamente as aplicações das suas ligas. Dentre os elementos de liga que podem ser combinados com o alumínio, destaca-se o silício. As ligas de Al-Si apresentam fundibilidade superior em comparação às outras ligas, baixa massa específica, baixo coeficiente de expansão térmica, alta resistência ao desgaste, alta rigidez específica e alta resistência à corrosão (ZHANG *et al.*, 2019). No entanto, a quantidade e a morfologia das partículas eutéticas de silício têm efeito significativo nas propriedades mecânicas das ligas Al-Si. Na microestrutura fundida, o silício eutético tem estrutura lamelar ou acicular grosseira que é prejudicial às propriedades mecânicas. Ao modificar a morfologia acicular para esferoidal, as propriedades mecânicas são melhoradas (ABDELAZIZ *et al.*, 2020). Ademais, estudos da corrosão em ligas à base de Al são de interesse tecnológico uma vez que essas ligas são utilizadas na fabricação de componentes de elevado valor agregado, como em peças automotivas e rodas de liga leve, por exemplo. Dessa forma, a corrosão pode ser definida como a degradação de materiais na relação dos mesmos com o ambiente (VIRTANEN, 2009). As reações de corrosão são de natureza eletroquímica, ou seja, a reação pode ser dividida em reação de oxidação (reação anódica) e reação de redução (reação catódica). As reações anódicas e catódicas podem ocorrer por toda superfície, levando à corrosão uniforme, ou podem ser separadas em sítios catódicos e anódicos específicos da superfície, levando à corrosão localizada (VIRTANEN, 2009). Como o silício é catódico em relação à matriz rica em alumínio, pares micro-galvânicos podem ser formados resultando no fenômeno de corrosão localizada (ARRABAL *et al.*, 2013). Diante disso, o presente trabalho concentrou-se no estudo da degradação pela corrosão das ligas A356 (Al7%Si) e A413 (Al11%Si), que pertencem ao sistema alumínio-silício, em imersão na solução corrosiva de cloreto

de sódio (NaCl, 3,5% m/v), observando o impacto da corrosão generalizada na perda de massa e no aspecto visual das amostras ao longo do tempo de imersão.

METODOLOGIA

A manufatura dos corpos de prova (CPs) foi realizada em escala industrial, na qual pedaços de rodas das ligas A356 e A413 fundidas à baixa pressão foram usinados em torno CNC, conforme o modelo desejado para estudo e em seguida foram inseridos em torno manual, onde foi realizado um orifício central. Após isso, os CPs foram cortados com o auxílio de uma serra, resultando em CPs menores, com diâmetro de $12,4 \pm 0,1$ mm e espessura de $4,4 \pm 0,4$ mm. Após isso, os mesmos foram submetidos aos ensaios de corrosão, onde os CPs das ligas A356 e A413 foram usados nos ensaios de perda de massa de acordo com a norma ASTM G1 (2003). Desta forma, tais CPs foram submetidos a tratamento superficial em politriz (Arotec - modelo Aropol 2VPU) utilizando papel abrasivo de carbetto de silício com gramaturas #320, #400 #600, #1200 lubrificadas em água. Após os CPs foram desengraxados usando uma mistura de acetona e álcool (1:1, v/v). Todos os CPs foram pesados em balança analítica (SHIMADZU - AUW220, 10^{-4} g) para obtenção da massa inicial, e foram fotografados e analisados em microscópio OLYMPUS GX41 com aumento de 300x e 600x para registro e observação das modificações ao longo do tempo de imersão. Em seguida, os CPs foram completamente imersos em frascos reagentes rosqueados cilíndricos (100 mL) contendo 40 mL de solução de NaCl, 3,5% m/v. Nestes recipientes, os mesmos foram aparados através de um fio de nylon, onde permaneceram até os momentos determinados para limpeza. No início, a limpeza foi realizada semanalmente, e com o passar do tempo passou a ser realizada com maior espaçamento entre os tempos. A cada limpeza, foi usada solução contendo 20 g de ácido crômico (CrO_3), 50 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4)/L de água à 85°C , onde os CPs foram inseridos durante 5 min. e em seguida retirados e secos cuidadosamente. Posteriormente, os CPs foram mergulhados em ácido nítrico (HNO_3) por 1 min., finalizando o processo de limpeza. Após a limpeza, estes foram secos com circulação de ar natural e depois foram colocados em agitador orbital com aquecimento à 72°C por 2h para garantir que toda água fosse retirada do CP para não comprometer as análises seguintes. Após resfriamento em temperatura ambiente ($27 \pm 2^\circ\text{C}$), tiveram seus diâmetros e a espessuras medidos. Isso foi feito com a finalidade de determinar a perda de massa ocorrida no material em contato com o meio corrosivo. Além disso, os CPs foram novamente pesados e fotografados para que a perda de massa e a degradação causada pela corrosão durante o ensaio de imersão fossem analisadas ao longo do estudo. Neste trabalho, foram usados quatro CPs de cada liga (A356 e A413). Dois dos CPs foram inseridos em frasco reagente rosqueado (100 mL) com presença de luz, ou seja, os frascos foram inseridos em um compartimento vedado, contendo uma lâmpada LED em seu interior que se manteve em contato direto com o recipiente, a fim de analisar a influência da incidência da luz nas ligas. Já os outros dois CPs foram analisados com ausência completa de luz. Para isso, os frascos reagentes foram cobertos com papel alumínio e mantidos em compartimento fechado com ausência total de luz. Todas as análises foram feitas em triplicata. A escolha da presença e ausência de luz se deve às rodas automotivas ficarem frequentemente em presença de luz natural e artificial e como muitas rodas contam com camadas de proteção, então, a ausência de luz deste estudo tenta simular um pouco dos efeitos dessas camadas.

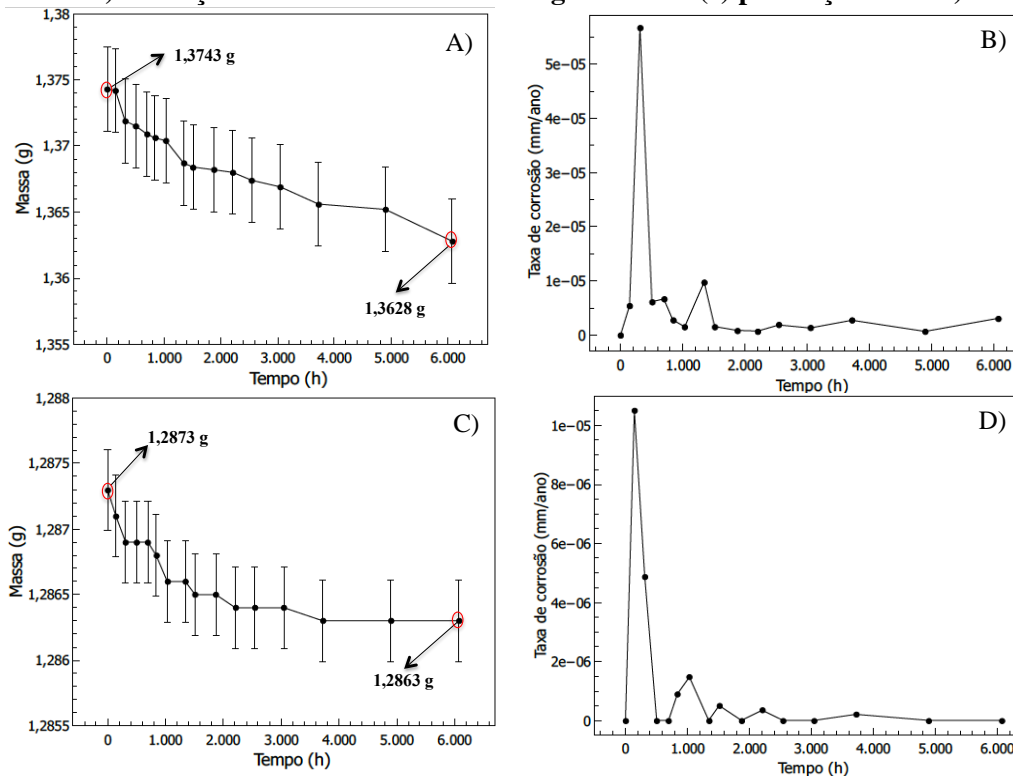
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para compreender o impacto da corrosão, as perdas de massa e as taxas de corrosão das ligas A356 e A413 foram analisadas durante as 6072h (253 dias, ~8 meses). As Figuras 1 e 2 mostram a respectivas ligas A356 e A413, sendo que para ambas as imagens, a letra (a) e (b) representam a presença e ausência de luz e as letras (c) e (d) as taxas de corrosão obtidas ao longo de tempo de imersão nas mesmas condições, respectivamente.

Na presença de luz (Figuras 1 e 2(a)) verifica-se a variação da massa de 1,3743 g (A356) e 1,3325 g (A413) (0h) para 1,3628 g (A356) e 1,3242 g (A413) (~6000 h), perdendo assim 11,5 mg e 8,3 mg na presença e ausência de luz, respectivamente. Isso equivale a aproximadamente 0,84% e 0,63% da massa inicial. Para os CPs analisados na ausência de luz (Figuras 1 e 2(c)), a variação foi

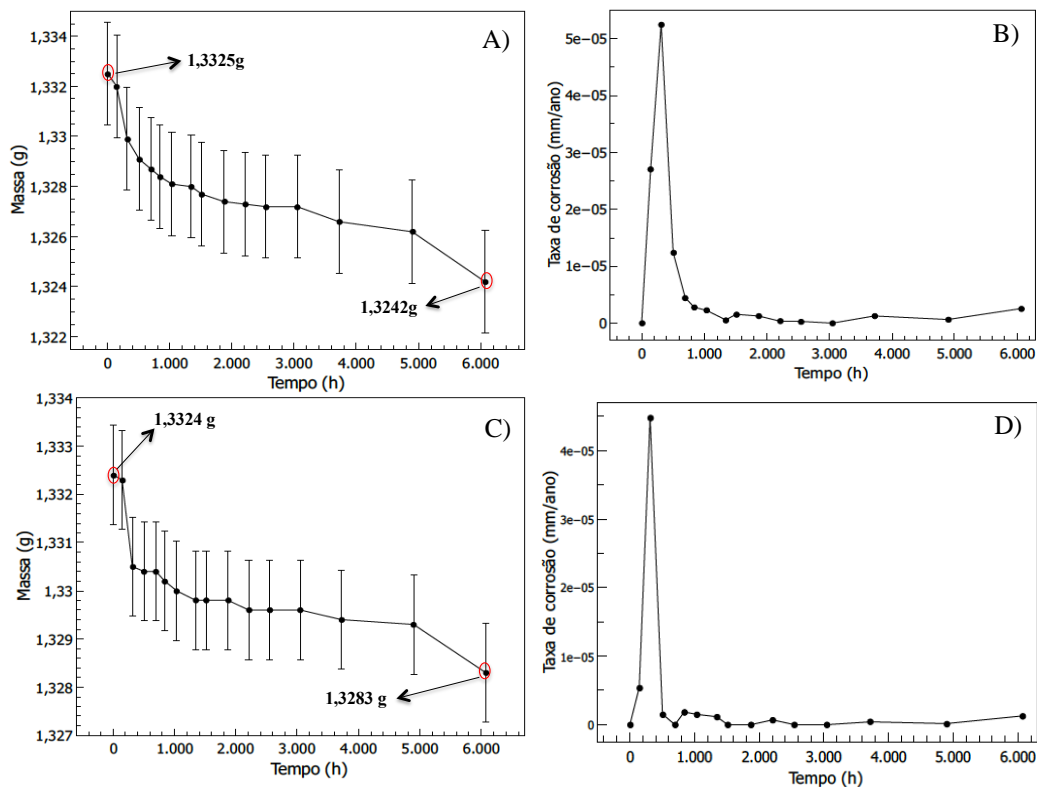
de ~1 mg (A356) e 4,1 mg (A413), isso representa perda de massa pela degradação por corrosão de respectivamente 0,08% e 0,31%.

Figura 1. Variação de massa da liga A356 exposta à corrosão na (a) presença de luz (b) ausência de luz c) Variação da taxa de corrosão da liga A356 na (c) presença de luz d) ausência de luz.



Fonte: autoria própria.

Figura 2. Variação de massa da liga 413 exposta à corrosão na (a) presença de luz (b) ausência de luz c) Variação da taxa de corrosão da liga A356 na (c) presença de luz d) ausência de luz.



Fonte: autoria própria.

Os resultados da taxa de corrosão na presença (Figura 1(b)) e ausência de luz (Figura 1(d)), para as respectivas ligas A356 e A413, que foram obtidos a partir dos ensaios de imersão e após 6072h mostram o mesmo comportamento. Isto é, em ~312h, houve aumento significativo da taxa de corrosão, na ordem de 0,05 e 0,01 $\mu\text{m}/\text{ano}$ para a liga A356 na presença e ausência de luz, respectivamente e 0,05 $\mu\text{m}/\text{ano}$ e 0,04 $\mu\text{m}/\text{ano}$ para a liga A413. Após este período, queda acentuada foi observada, sendo que a resistência à corrosão é observada para ambas as ligas, onde também observou-se insignificante perda de espessura e diâmetro dos CPs ao longo do ensaio.

Para melhor compreensão da atuação do meio corrosivo em contato com as ligas e a relação da microestrutura com a degradação por perda de massa, as Figuras 3 e 4 mostram os CPs antes e após a imersão (6072h) na presença e ausência de luz das ligas A356 e A413.

Figura 3. Superfície e microscopia da liga A356 (a) 0h; (b) 6072h na presença de luz (c) 6072h na ausência de luz.

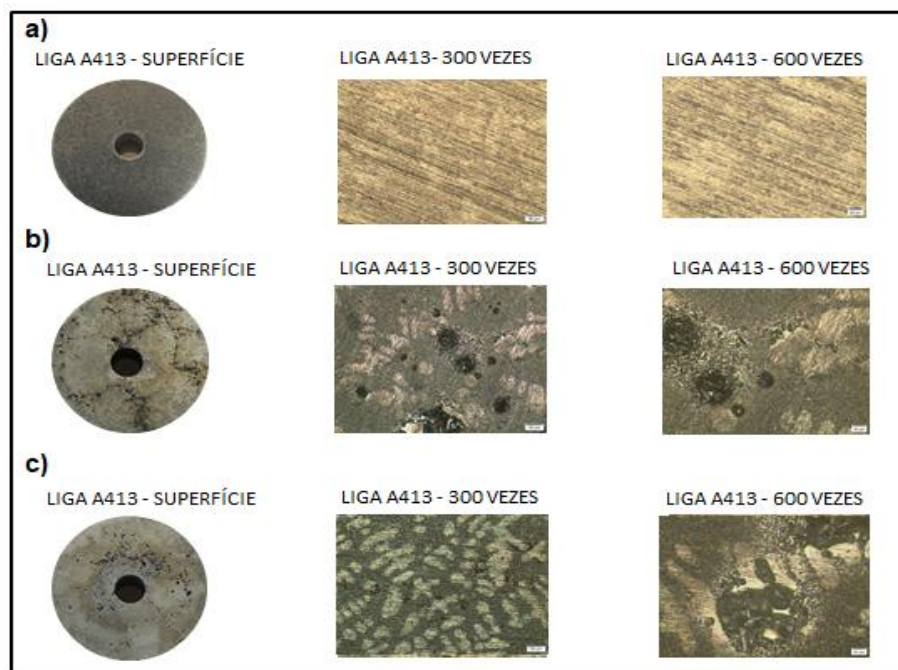


Fonte: autoria própria.

Através das imagens pode-se perceber que antes da corrosão (Figura 3 (a)) a superfície ainda não apresenta poros e manchas. Já após 6072h de ensaio na presença de luz (Figura 3 (b)) vê-se uma superfície com furos maiores e em maiores quantidades. Manchas também são destacadas, variando de tons em diferentes regiões do CP. A morfologia apresenta dendritas bem definidas e poros grandes e profundos. Um comportamento similar também pôde ser observado na corrosão com ausência de luz após 6072h (Figura 3 (c)), no qual a superfície do CP está totalmente comprometida com manchas realçadas e grande número de poros. Sua morfologia apresenta furos grandes e próximos uns dos outros. Logo, embora a perda de massa não seja expressiva na liga, a corrosão impacta muito em seu aspecto físico e microestrutural.

Semelhante à liga A356, a liga A413 antes da corrosão apresenta uma superfície sem furos e manchas. No entanto, a mesma também apresenta dendritas visíveis. Após 6072h de corrosão exposta à luz (Figura 4(b)), a superfície do CP se mostra completamente comprometida, com furos profundos, caminhos de poros e manchas de diferentes tons. Sua microestrutura também mostra grande poros, principalmente nas regiões em torno das dendritas. O mesmo ocorre com o CP na ausência de luz (Figura 4 (c)), que também apresenta manchas e poros profundos, embora sejam em menor quantidade. Além disso, a microestrutura apresenta grandes poros nas proximidades das dendritas.

Figura 4. Superfície e microscopia da liga A413 (a) 0h; (b) 6072h na presença de luz (c) 6072h na ausência de luz.



Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

O presente estudo concentrou-se na análise de perda de massa e taxa de corrosão das ligas A356 e A413 ao longo de 6072h. A imersão das ligas A356 e A413 em NaCl mostrou que as ligas são resistentes à corrosão, perdendo quantidade de massa muito baixa (menor que 1%) e tendo uma taxa de corrosão bem pequena (na faixa $\sim 10^{-5}$ e $\sim 10^{-6}$ mm/ano). No entanto, apesar deste baixo impacto, as superfícies e as microestruturas foram visivelmente afetadas. Também é importante ressaltar que em ambas as ligas, os CPs expostos à corrosão na presença de luz sofreram maior redução de massa e maior taxa de corrosão em comparação aos CPs submetidos à corrosão na ausência de luz. Logo, a presença de luz contribuiu para o processo de corrosão. Além disso, a liga A413 foi visivelmente mais afetada pela corrosão em comparação a liga A356, tendo suas superfícies e morfologias comprometidas.

BIBLIOGRAFIA

- ABDELAZIZ, M.H., SAMUEL, A.M., DOTY, H.W., SAMUEL, F.H. Effect of morphological changes of eutectic Si particles on the ambient and high temperature tensile properties of Zr containing Al-Si alloys. **Journal of Materials Research and Technology**, 9, p. 5962-5981, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G1-03: Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. ASTM, 2003.
- AROWOSOLA, A., GAUSTAD, G. Estimating increasing diversity and dissipative loss of critical metals in the aluminum automotive sector. **Resources, Conservation and Recycling**, 150, 2019, 104382.
- ARRABAL, R., MINGO, B., PARDO, A., MOHEDANO, M., MATYKINA, E., RODRÍGUEZ, I. Pitting corrosion of rheocast A356 aluminium alloy in 3.5 wt.% NaCl solution. **Corrosion Science**, 73, p. 342-355, 2013.
- MERLIN, M., TIMELLI, G., BONOLLO, F., GARAGNANI, G.L. Impact behaviour of A356 alloy for low-pressure die casting automotive wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, 209, p. 1060-1073, 2009.
- NA, J., MU, W., QIN, G., TAN, W., PU, L. Effect of temperature on the mechanical properties of adhesively bonded basalt FRP-aluminum alloy joints in the automotive industry. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 85, p. 138-148, 2018.
- VIRTANEN, S. Electrochemical theory/corrosion. **Encyclopedia of Electrochemical Power Sources**, p.56-63, 2009.
- ZHANG, X., HUANG, L.K., ZHANG, B., CHEN, Y.Z., LIU, F. Microstructural evolution and strengthening mechanism of an Al-Si-Mg alloy processed by high-pressure torsion with different heat treatments. **Materials Science and Engineering: A**, 794, 2020.