

Evaluación por técnicas electroquímicas de la corrosión en aleaciones comerciales de aluminio

Evaluation by electrochemical techniques of corrosion in commercial aluminum alloys



<https://cu-id.com/2144/v17e05>

Jocelaine Carvajal Alvarez*, **Nelson Felipe Llovet de Armas**, **Yosmari Adames Montero**

RESUMEN: El presente trabajo sienta sus bases en la evaluación del comportamiento ante la corrosión electroquímica de dos aleaciones de aluminio utilizadas en la fabricación de elementos (pontones o flotadores) de tanques de almacenamiento de combustibles con sistema de membrana interna flotante, que con frecuencia se encuentran localizados en complejos industriales cercanos al mar y que suelen presentar problemas de deterioro. Mediante la aplicación de las técnicas de curvas de polarización potenciodinámicas y ruido electroquímico, se pudo analizar el efecto del tiempo de inmersión de las aleaciones Al-3004 y Al-5052 en solución de agua de mar sintética a diferentes valores de pH, a fin de aportar información referente a la microestructura, la morfología de las picaduras y la participación de las partículas intermetálicas en el proceso, facilitando así la posibilidad de conocer el grado de resistencia a la corrosión. Los resultados alcanzados en esta investigación demostraron que en ambas aleaciones está presente el tipo de corrosión localizada y que en medio básico la aleación Al-5052 es más propensa a la pasivación, lo que se atribuye a su estructura y composición química. En medio ácido ambas aleaciones presentan comportamientos similares, ausencia de una región pasiva y corrosión altamente localizada.

Palabras clave: aleaciones de aluminio, corrosión localizada, técnicas electroquímicas, agua de mar sintética.

ABSTRACT: This work is based on the evaluation of the behavior against electrochemical corrosion of two aluminum alloys used in the manufacture of elements (pontoons or floaters) of fuel storage tanks with a floating internal membrane system, which are often located in industrial complexes near the sea and which may present problems of deterioration. Through the application of techniques of potentiodynamic polarization curves and electrochemical noise, it is possible to analyze the effect of the time of immersion of the Al-3004 and Al-5052 alloys in synthetic seawater solution at different pH values, in order to provide information regarding the microstructure, the morphology of the bites and the participation of intermetallic particles in the process, thus facilitating the possibility of knowing the degree of resistance to corrosion. The results achieved in this investigation demonstrated that in both areas the type of localized corrosion is present and that in basic media the Al-5052 area is more prone to breakdown, which is attributed to its structure and chemical composition. In acidic media, both species present similar behavior, with the absence of a passive region and highly localized corrosion.

Keywords: aluminum alloys, localized corrosion, electrochemical techniques, synthetic sea water.

INTRODUCCIÓN

El aluminio y sus aleaciones poseen una combinación de propiedades mecánicas, físicas, y químicas que los convierten en materiales útiles para la industria automotriz, petrolera, aeroespacial, de construcción, arquitectónica, entre otras. Sin embargo, estas aplicaciones no están exentas de inconvenientes ya que diversas aleaciones a base de aluminio ven afectada su resistencia a la corrosión y fatiga, en especial en ambientes salinos.

El uso de las aleaciones de aluminio en la industria del “Oro Negro”, se ha convertido en una operación que cada vez es más complicada,

ya que las condiciones medioambientales son cada vez más difíciles de controlar. En la industria del petróleo techos de cúpula geodésica y cubiertas soportadas por flotadores en tanques que almacenan productos derivados del petróleo, son ejemplos de estructuras fabricadas de estas aleaciones (Groysman, 2014).

El aluminio es un metal reactivo, su resistencia a la corrosión se atribuye a la existencia de una delgada capa de óxido superficial típicamente de 2 a 5 nm de espesor, conocida como película pasiva, la que es relativamente estable y resistente a la corrosión en un rango de pH entre 4,0 y 8,5.

Recibido: 19/05/2024

Aprobado en su forma original: 12/06/2025

Centro de Investigaciones del Petróleo, CEINPET. Churrucá No.481 e/ Washington y Vía Blanca. Cerro, La Habana. Cuba.

E-mail: nelsonllovet01@gmail.com, yosmari@ceinpet.cupet.cu

*Correo electrónico: jocelaine.caravajal@ceinpet.cupet.cu

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses entre ellos, ni de los autores con otras instituciones relacionadas con el contenido del artículo.

Contribuciones de los autores: **Gestión de Proyecto:** Jocelaine Carvajal Álvarez. **Investigación:** Jocelaine Carvajal Álvarez, Nelson Felipe Llovet de Armas y Yosmari Adames Montero. **Metodología:** Jocelaine Carvajal Álvarez, Nelson Felipe Llovet de Armas y Yosmari Adames Montero. **Análisis formal:** Jocelaine Carvajal Álvarez y Nelson Felipe Llovet de Armas. **Redacción - revisión y edición:** Jocelaine Carvajal Álvarez y Nelson Felipe Llovet de Armas.

Artículo bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Sin embargo la susceptibilidad a la corrosión por picadura de las aleaciones de aluminio ha sido estudiada ampliamente, aunque quedan aspectos relevantes por vislumbrar, tales como: el exacto mecanismo de la iniciación y nucleación de la picadura (Esquivel & Gupta, 2020).

La corrosión por picadura es una forma de corrosión localizada que se presenta generalmente en los metales que poseen una capa de óxido protectora. La película de óxido impide la difusión del oxígeno hacia el metal base y su estabilidad depende en gran medida de la composición de la aleación (LLovet de Armas y Rivera, 2022).

Los elementos metálicos que son añadidos con el propósito de aumentar la resistencia de las aleaciones de aluminio, conducen a la formación de grandes precipitados intermetálicos que se agrupan en partículas gruesas y precipitados finos (dispersoides). El tipo y la composición de los intermetálicos varían según la composición de la aleación y el tratamiento térmico aplicado.

Otros factores que influyen en la corrosión de las aleaciones de aluminio, son: los iones haluros, temperatura y el pH del medio. Se conoce que las aleaciones pasivas en entornos que contienen haluros, inducen la ruptura de la película de óxido termodinámicamente estable (Abbas Raza *et al.*, 2022). Por lo anterior, la mayoría de las formas de corrosión puede ocurrir en el agua de mar debido a que es un medio particularmente rico en cloruros y de muy baja resistividad eléctrica, lo que facilita la mayoría de las reacciones electroquímicas (Vargel, 2020). En agua de mar la pasivación del metal se vuelve inestable, lo que propicia corrosión del tipo localizada en los lugares más vulnerables de la película (Fang *et al.*, 2020).

El pH es un factor que se relaciona con los procesos de corrosión del aluminio y sus aleaciones, en medios ácidos y alcalinos genera que la solubilidad del aluminio aumente, y, por ende, se corroe más rápidamente. La pasivación se puede suprimir variando el pH, así como la adición de iones cloruros (Mazhar *et al.*, 2001).

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se utilizaron dos muestras de aleaciones aluminio, Al-3004 y Al-5052, obtenidas de un flotador del sistema de membrana de un tanque de combustible, figura 1.

Las muestras metálicas laminadas de dimensión 2x1 cm, fueron montadas en resina Araldite para facilitar su manipulación.



Figura 1. Esquema de flotador.

Análisis de la estructura

En la preparación de la superficie metálica se utilizó pulidora metalográfica modelo Metasinx y papeles abrasivos de SiC con las granulometrías siguientes: 320, 400, 500, 600, 800 y 1000. Para alcanzar un acabado espejo se empleó pulidora mecánica modelo Micropol-1 Auto y paño con pasta de diamante. Las operaciones mencionadas se realizaron en correspondencia a la norma (ASTM E3-11, 2017). Para el revelado de la microestructura se utilizó la disolución de ataque químico No. 1a, de composición: 1 mL de HF y 100 mL de agua (ASTM E407-07, 2015). Las micrografías se obtuvieron a 25X y 10X de aumento, en microscopio metalográfico de luz reflejada Modelo Axiovert 25 ZEISS, las imágenes se captaron en cámara digital Infinity 1 acoplada al microscopio, figura 2.

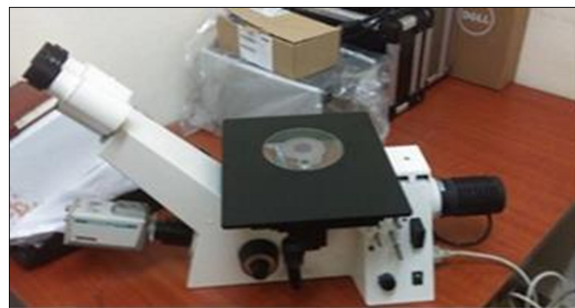


Figura 2. Microscopio metalográfico Axiovert 25 de la Zeiss.

Para conocer la dimensión aproximada de algunos microconstituyentes, se empleó micrómetro digital de exteriores Mitutoyo de rango 0-25 mm, acoplado al microscopio metalográfico, figura 3.

Las composiciones químicas elementales de ambas aleaciones cumplen con lo especificado en norma (ASTM B209-07, 2007) (ver tabla 1).

Ensayos electroquímicos

En los ensayos electroquímicos se utilizó como celda electroquímica, beaker de 250 ml de capacidad y los componentes siguientes: electrodos de trabajo (ET) de área expuesta 0,34 cm² (Al-3004) y 0,33 cm² (Al-5052), electrodo de referencia de Ag/AgCl (ER), electrodo auxiliar de grafito (EA). Las superficies de los ET se prepararon según norma (ASTM G1-03, 2017).

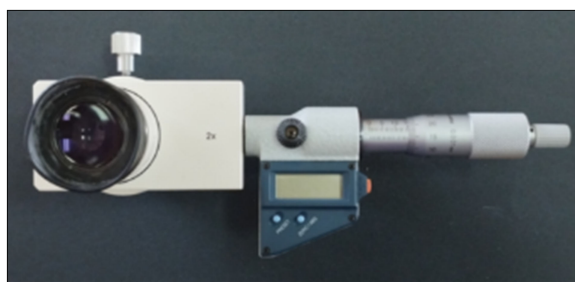


Figura 3. Micrómetro digital Mitutoyo.

Tabla 1. Composición química elemental de las aleaciones Al-3004 y Al-5052 (%peso)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
Al-3004	0,2	0,7	0,15	1,04	0,9	0,02	0,005	0,05	0,02	96,8
Al-5052	0,1	0,3	0,001	0,06	2,6	0,18	0,001	0,002	0,003	96,8

La celda electrolítica se acopló mediante cables recubiertos al equipo multipropósito Field Machine serial No. 1703 de dos canales secuenciales de la firma ACM Instruments, **figura 4**. Los ensayos se ejecutaron bajo condiciones de circuito abierto a temperatura de 30°C.



Figura 4. Field Machine

La **figura 5**, presenta el montaje experimental de ambas técnicas.

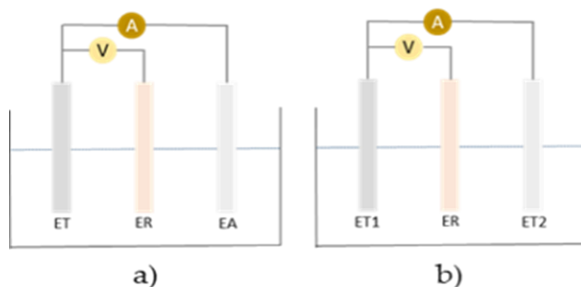


Figura 5. Montaje experimental de las celdas: a) Curva de Polarización Potenciodinámica y b) Ruido Electroquímico.

Para cada registro se estableció con anticipación un período de una hora para estabilizar el potencial del ET en contacto con la disolución corrosiva.

La técnica de curvas de polarización potenciodinámicas se aplicó según norma (ASTM G5-14?1, 2014). Para la obtención de las ramas anódicas y catódicas se realizó un barrido de potencial -500 mV a 1500 mV respecto al Ecorr, a una velocidad de 60 mV/min.

En la técnica de ruido electroquímico, se emplearon las normas ISO/DIS 17093 (2013) y ASTM G199-09 (2014). La tasa de muestreo fue de 1 punto/segundo y se hicieron 2048 registros en la serie tiempo. Los resultados se analizaron de modo cualitativo y cuantitativo. Estos últimos permitieron obtener el índice de localización (IL), según las **ecuaciones 1 y 2**.

$$IL = \frac{\sigma}{i_{rms}} \quad (1)$$

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t^2)} \quad (2)$$

Los ensayos electroquímicos se llevaron a cabo en agua de mar sintética a pH 8,3 (ASTM D1141-98, 2003), y a pH 4,0 acidificada con ácido acético glacial. Todos los ensayos se realizaron en condiciones estáticas y a temperatura de 30 °C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultado del análisis de la estructura

Las micrografías presentadas en la **figura 6**, revelaron diferencias entre las microestructuras de las aleaciones objeto de estudio. La aleación Al-3004 (ver **figura 6a**), presenta mayor densidad de partículas e inclusiones que la aleación Al-5052, relativamente homogénea (ver **figura 6b**).

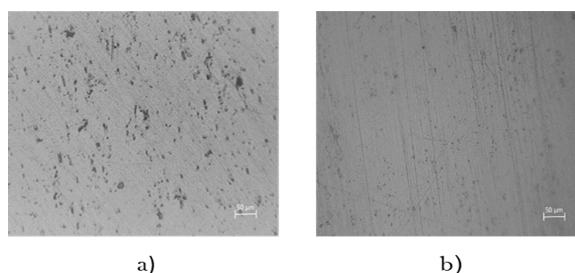


Figura 6. Microestructura de las aleaciones de aluminio (aumento 10X): a) Al-3004 y b) Al-5052

La **figura 7**, revela que algunas partículas en la aleación Al-3004 poseen un tamaño superior a 1 µm, dimensión considerada crítica y en la que se ha demostrado una relación directa entre el deterioro de la resistencia a la corrosión con el incremento del tamaño de estas fases intermetálicas (Culliton y Kennedy, 2013).

Resultados de los ensayos electroquímicos

Las curvas de polarización potenciodinámicas en agua de mar sintética sin acidificar, muestran en ambas aleaciones un aumento marcado de la densidad de corriente en torno a un potencial de -600 mV, que se atribuye a la ruptura de la película y posterior nucleación de picaduras en puntos específicos de la superficie metálica (ver **figura 8a**). También se observan diferencias en las ramas anódicas en cuanto a extensión de la región pasiva. En contraste, en medio acidificado (ver **figura 8b**) no se aprecia una región

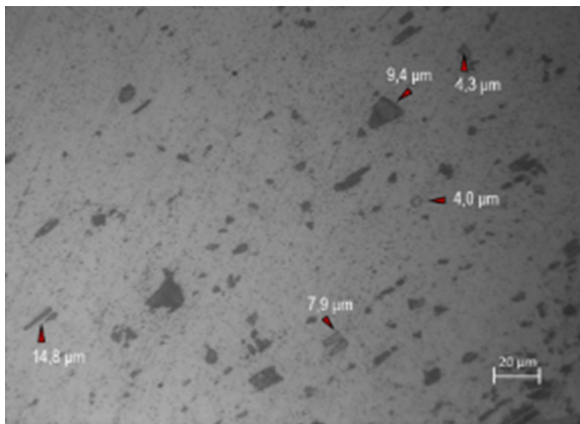


Figura 7. Intermetálicos en aleación Al-3004 (aumento 25X)

pasiva en ambos materiales, por lo que se infiere que las condiciones agresivas del medio no permitieron la formación estable de una película protectora. En tal caso, el potencial de ruptura (E_r) y el potencial de corrosión (E_{corr}) pueden considerarse iguales para fines prácticos, ya que las pendientes anódicas son muy bajas y similares, **figura 8**.

El comportamiento en la rama anódica se podría atribuir al tipo de carga en la superficie de las aleaciones. En solución, a pH 4,0, las superficies metálicas estarían probablemente cargadas positivamente, lo que propiciaría la atracción de iones Cl^- y posterior ataque a la película de óxido, lo que estaría reflejado en la carencia de una región pasiva y en un aumento de la densidad de corriente de corrosión (i_c). Por otro lado, un agua protonada a pH 8,3 se adsorbería en la superficie cargada negativamente, dando lugar a condiciones pasivas, que permitan la formación de un precipitado hidróxido (Mazhar *et al.*, 2001).

Según menciona Bakhtiarinejad *et al.* (2014), al establecer los valores de E_{corr} y E_r , el rango de pasividad de las aleaciones de aluminio se podría determinar por diferencia entre estos potenciales. En correspondencia, los resultados de las aleaciones en agua de mar sintética sin acidificar demuestran que la aleación Al-5052 se encuentra pasiva en un rango más amplio de potenciales al ser mayor su diferencia (ver **tabla 2**).

Tabla 2. Indicadores obtenidos de los ensayos de curvas de polarización potenciodinámicas

Agua de mar sintética	Material	i_c mA/cm ²	E_{corr} mV	E_{pic} mV	$E_{pic} - E_{corr}$ mV
pH 4,0	Al-5052	$2,7 \times 10^{-2}$	-680	-680	-
	Al-3004	$2,0 \times 10^{-2}$	-645	-645	-
pH 8,3	Al-5052	$2,5 \times 10^{-3}$	-928	-640	-288
	Al-3004	$3,8 \times 10^{-3}$	-766	-663	-103

En relación a las densidades de corriente de corrosión, en cada condición establecida estuvieron en órdenes similares, no obstante, al compararse el comportamiento en los medios corrosivos, se observa que las densidades de corriente en medio ácido presentaron valores ligeramente superiores.

El análisis cualitativo de los registros de potencial y corriente en el tiempo para las aleaciones en agua de mar sintética sin acidificar (ver **figura 9**), revela que la aleación Al-3004 presentó marcadas fluctuaciones de corriente, lo que guarda correspondencia con cambios visibles en el potencial en el tiempo. Tal comportamiento es propio de la ocurrencia de eventos de picaduras, que podrían atribuirse a una mayor presencia de intermetálicos de dimensiones considerables que propiciarían la formación de numerosas microceldas galvánicas (Cheng *et al.*, 2003).

En contacto con agua de mar sintética acidificada las aleaciones presentan mayores niveles de ruido (ver **figura 10**), lo que sugiere que la corrosión se torna altamente localizada generándose rápidamente sitios anódicos estables. De acuerdo a Abbas Raza *et al.* (2022), la evolución de H_2 en forma de efervescencia en la superficie de las aleaciones de aluminio en estas condiciones, genera alta turbulencia, lo que podría promover la formación de picaduras e inestabilidad de la película de productos formada en la superficie metálica.

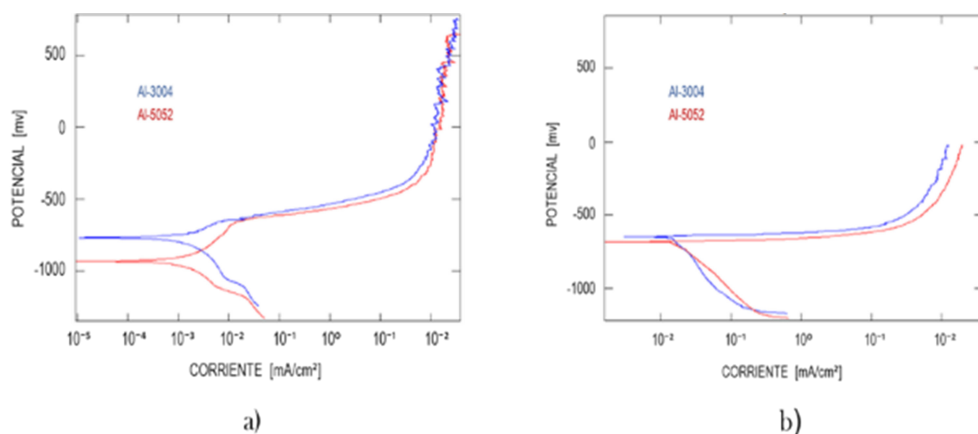


Figura 8. Curvas de polarización potenciodinámicas de las aleaciones de Al en agua de mar sintética: a) pH 8,3 y b) pH 4,0

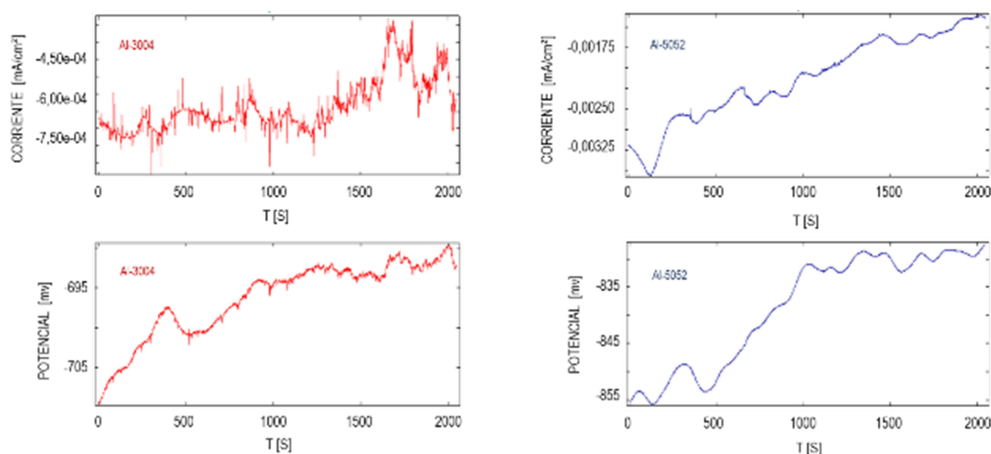


Figura 9. Registro en el tiempo de densidad de corriente y potencial de las aleaciones de Al en agua de mar sintética a pH 8,3.

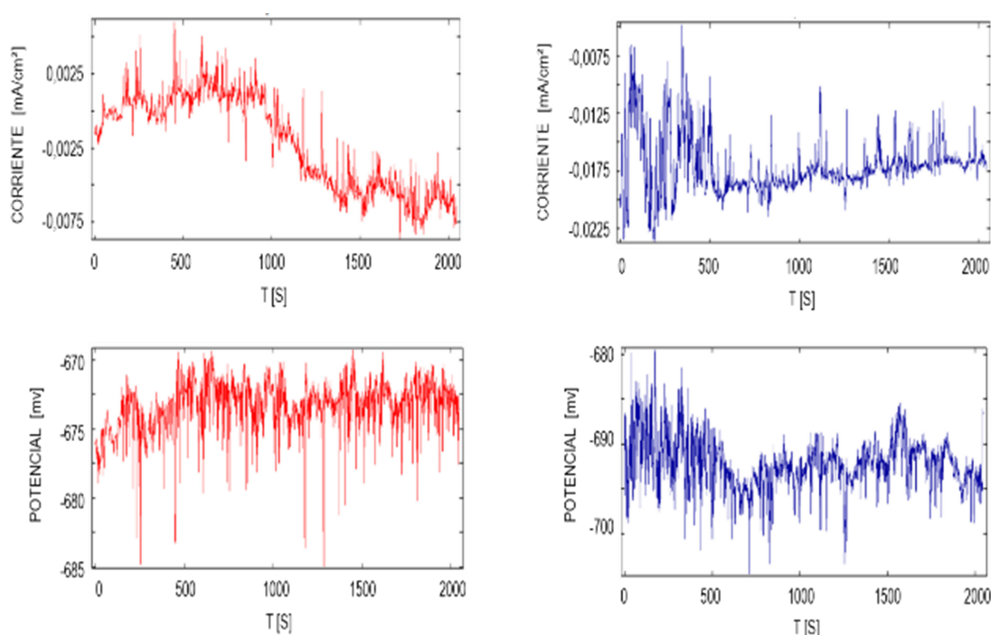


Figura 10. Registro en el tiempo de densidad de corriente y potencial de las aleaciones de Al en agua de mar sintética a pH 4

El análisis cuantitativo de los datos de corriente arrojó que los índices de localización (IL) obtenidos de los diferentes sistemas se encuentran en valores cercanos a 1, lo que implica que la corrosión predominante sería del tipo localizada (ver [tabla 3](#)).

CONCLUSIONES

De la investigación realizada se puede concluir que entre las aleaciones de aluminio ensayadas, existen diferencias en el comportamiento frente a la corrosión en agua de mar sintética a pH 8,3.

La aleación Al-5052 presentó una región pasiva superior que la aleación Al-3004, lo que demuestra su mayor resistencia en este medio. El resultado podría atribuirse a una microestructura más homogénea con menor concentración de particulados incompatible con la matriz metálica. En medio acidificado pH 4,0, los resultados de las técnicas electroquímicas son similares en ambas aleaciones, no muestran regiones pasivas y evidencian altos niveles de ruido, lo que se adjudica a la severidad de la solución. En todas las condiciones ensayadas el tipo de corrosión predominante fue localizada, según el criterio del IL.

Tabla 3. Clasificación de la corrosión según intervalos de IL y valores del IL para las condiciones ensayadas

Tipo de Corrosión	IL	IL / pH 8,3		IL / pH 4,0	
Localizada	1 - 0,1	Al-3004	Al-5052	Al-3004	Al-5052
Mixta	0,1 - 0,01				
Generalizada o Pasiva	0,01 - 0,001	0,99	0,23	0,62	0,61

BIBLIOGRAFÍA

- Abbas R, S., A Karim, M. R., T Shehbaz, A Taimoor, R. Ali & I Khan. 2022. *Effect of pH and Concentration on Electrochemical Corrosion Behavior of Aluminum Al-7075 T6 Alloy in NaCl Aqueous Environment*. Journal of Electrochemical Science and Technology, 13(2): 213-226.
- American Society for Testing and Materials. 2003. *Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water*. ASTM D1141-98. Available: <https://www.astm.org>, [Consulted: January 23, 2024].
- American Society for Testing and Materials. 2007. *Standard Specification for Aluminum and Aluminum - Alloy Sheet and Plate*. ASTM B209-07. <https://www.astm.org> [Consulted: January 23, 2024].
- American Society for Testing and Materials. 2014. Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. ASTM G5-14e1. <https://www.astm.org>, [Consulted: January 23, 2024].
- American Society for Testing and Materials. 2014. Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement ASTM G199-09. <https://www.astm.org>, [Consulted: January 23, 2024].
- American Society for Testing and Materials. 2015. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys (ASTM E407-07). <https://www.astm.org>
- American Society for Testing and Materials. 2017. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM E3-11. <https://www.astm.org>, [Consulted: January 23, 2024].
- American Society for Testing and Materials. 2017. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM G1-03. <https://www.astm.org>, [Consulted: January 23, 2024].
- Bakhtiarinejad, A., K. Ranjbar, A. Ashrafi, & B.Rezaei. 2014. Pitting corrosion and metastable pitting initiation rate of 5083 aluminum alloy in synthetic sea water as a function of medium pH. Metal 2014, Brno, Czech Republic, EU
- Cheng, Y.L., Zhang, Z., Cao, J.F., Zhang, J.Q., Wang, J.M. & Cao, C.N. 2003. *Study of the potential electrochemical noise during corrosion process of aluminum alloys 2024, 7075 and pure aluminum*. Materials and Corrosion, (54): 601-608.
- Culliton, D. T, Betts. & D. Kennedy. 2013. *Impact of Intermetallic Precipitates on the Tribological and/or Corrosion Performance of Cast Aluminium Alloys: A Short Review*. International Journal of Cast Metals Research, 26(2): 65-71. doi: <http://doi.org/10.1179/1743133612Y.0000000038>
- Delgado, T. & María, L. 2008. Sinterización con fase líquida de aleaciones de aluminio de la serie 2xxx: estudio de su aleación mecánica, adición de estaño y refuerzo con TiCN. Tesis de doctorado, Madrid: Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid.
- Esquivel, J. & R. K. Gupta, 2020. *Review Corrosion-Resistant Metastable Al Alloys: An Overview of Corrosion Mechanisms*. Journal of the Electrochemical Society, (167), 1-13.
- Fang, Z., J. Cao. & Y Guan. 2020. Corrosion Control Technologies for Aluminum Alloys Vessel. (1st ed.). Springer Science & National Defense Industry Press.
- Groysman, A. 2014. Corrosion in Systems for Storage and Transportation of Petroleum Products and Biofuels: Identification, Monitoring and Solutions (1st ed.). Springer Science.
- International Organization for Standardization & Draft International Standard. 2013. Corrosion of Metals and Alloys - Guidelines for corrosion test by electrochemical noise measurements. ISO/DIS 17093. <https://www.iso.org>, [Consulted: January 23, 2024].
- LLovet, N. F. & Y, River. 2022. *Corrosión localizada en flotadores del sistema de membrana en tanque utilizado para el almacenamiento de gasolina de aviación*. Revista Centro Azúcar, 49(1), 21-30.
- Mazhar, A.A, S.T Arab & E.A. Noor. 2001. *The role of chloride ions and pH in the corrosion and pitting of Al-Si alloys*. Journal of Applied Electrochemistry, (31): 1131-1140
- Ramírez, J.L., A,Carmona Hernández., G.G Aguilar., L.M Candó Peña Herrera., J.A Recio Hernández, & J, Uruchurtu Chavarín. 2022. *Use of the Faraday cage and the trend removal of the I_{DC} in measurements with electrochemical noise*. Revista Internacional de Educación en Ingeniería, 13(1): 1-10
- Rodríguez, O. 2014. *Soldadura del aluminio. Recomendaciones tecnológicas*. Ciencias Holguín. 20(3): 1-11
- Srinivasa, K. & K, Prasad Rao. 2004. *Pitting corrosion of heat-treatable aluminium alloys and welds: A reveiw*. Transaction on the Indian Institute of Metals, 57(6): 593-610.
- Vargel, C. 2020. Corrosion of Aluminium (2^{sd} ed.). Elsevier.