

CORROSIÓN DE AA 3003 EN MEDIO CON BACTERIAS ANAERÓBICAS

MARTA. I. CASTELLANOS^{1,2} ZOILABET DUQUE²

¹ Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt, Zulia, Venezuela. . e-mail:vivascastell@gmail.com

² Fundación Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas, Zulia, Venezuela. e-mail:zduque@inzit.gob.ve

Recibido: enero 2013

Recibido en forma final revisado: marzo 2014

RESUMEN

La aplicabilidad de las aleaciones de aluminio serie 3003 (AA 3003) es diversa en los sistemas industriales (tanques de almacenamiento, equipos químicos, entre otros). Esto se debe a su alta resistencia a la corrosión, como resultado de la formación de películas pasivas en medios oxidantes. Sin embargo, se carece de evidencias que indiquen su comportamiento en aplicaciones lacustres, en las cuales existe una importante formación de biomasa, por lo cual este trabajo describe el comportamiento del AA 3003 en medios exentos de oxígeno (reducidos). Para ello, se colocó el material en inmersión con cultivos bacterianos anaeróbicos, específicamente en medios con bacterias reductoras de sulfato (BRS) y bacterias heterótrofas totales facultativas (BHTF). Ambos tipos de microorganismos proceden de poblaciones sésiles desarrolladas en cupones extraídos del Lago de Maracaibo. Para la evaluación del comportamiento corrosivo se emplearon técnicas electroquímicas y microscópicas. Los resultados indicaron que la AA 3003, ante la presencia de las BHTF y SRB, incrementó la resistencia a la corrosión con el tiempo.

Palabras clave: AA 3003, Biocorrosión, EIS, SRB, Anaeróbicas.

EVALUATION OF AA 3003 EXPOSED TO MEDIA CONTAINING ANAEROBIC BACTERIA

ABSTRACT

The use of the 3003 series aluminum alloys (AA 3003) is diverse in the industrial systems (storage tanks, chemical equipments, among others). This is due to its high resistance to corrosion as a result of passive films developed in presence of oxidizing media. However, there is a lack of evidence to show their behaviour in lacustrine applications in which there is a significant biomass formation. For this reason, the objective of this paper is to describe the behavior of AA 3003 in oxygen-free (reduced) media. To this aim, the material was settled in immersion with anaerobic bacteria cultures, specifically in media containing sulphate-reducing bacteria (SRB) and total heterotrophic facultative bacteria (THFB). Both types of microorganisms came from sessile populations developed on coupons previously immersed in Maracaibo Lake. Electrochemical and microscopic techniques were used for the evaluation of the corrosive behavior. The results indicated that the AA-3003 resistance to corrosion increased over time, in presence of the BHTF and SRB.

Keywords: Aluminum, Al 3003, Biocorrosion, EIS, SRB, Anaerobic.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio tienen una amplia resistencia a la corrosión debido a la formación de una película pasiva, por oxidación espontánea ante la exposición de este material en medio aireado (Smirnov et al. 2008). Esta película se caracteriza por dos subcapas: una subcapa más compacta, denominada capa barrera, más próxima al aluminio base, con espesores entre 20 y 25Å, y otra subcapa más externa y permeable de bohemita (Al₂O₃·H₂O)

o bayerita (Al₂O₃·3H₂O) que crece lentamente en espesor con la humedad de la atmósfera. Las propiedades de Este óxido dependen, entre otros factores, de la composición química de la aleación y de los tratamientos térmicos aplicados. Reportada como estable químicamente (inerte) en el intervalo de pH de 4 a 8,5 (Wu et al. 1999), variando en espesor entre 40 y 100Å según las condiciones de formación.

El Diagrama E-pH del Aluminio (Pourbaix) describe

una estabilidad termodinámica de la película de óxido de aluminio en rangos de pH 4-8,5, a 25 °C, donde la ruptura de la película pasiva, es la principal causa de la corrosión localizada. En los casos de ausencia de oxígeno, no se logra el reestablecimiento del óxido protector, por lo cual el daño puede ser severo ante condiciones agresivas por metabolitos bacterianos e inclusive por iones haluros (De Vega, 2011).

El material utilizado para este estudio procede de la empresa nacional ALCASA, aleación de aluminio 3003 (Al-Mn), caracterizada por su fases intermetálicas $Fe_{1,7}Al_4Si$ (Paredes-Dugarte et al. 2007).

Entre las múltiples aplicaciones de las aleaciones de aluminio se encuentran las de preservación y transporte de alimentos, herramientas de uso doméstico e industrial, infraestructura en transporte naval y aéreo, entre otras (Hollingsworth & Hunsicker, 1997). En aplicaciones industriales como tubos para intercambiadores de calor, así como en las navales como instalaciones acuáticas y embarcaciones, se han reportado problemas asociados con el biofouling (aglomeración de macro y micro organismos, visibles por coloración, textura y espesor). El deterioro reportado se describe como resistencia al paso de los fluidos, lo cual repercute directamente en la eficiencia del sistema. Sin embargo, más allá de esta problemática poco se conoce sobre la incidencia corrosiva de los microorganismos que conforman esa interfaz (biopelícula) en estas aleaciones de aluminio, encontrándose pocos estudios al respecto, en los cuales se indica el desarrollo de picaduras por corrosión inducida microbiológicamente (MIC del Inglés Microbially Induced Corrosion) por la actividad bacteriana (Orneck et al. 2002). Igualmente se ha reportado influencia por colonizaciones de hongos, asociándose la acción local de los ácidos orgánicos y grasos aeróbicos, además de la corrosión que se promueve por la celda diferencial de aireación que generan estos micro hábitats espacialmente localizados sobre la película pasiva (Smirnov et al. 2008).

Con respecto a la MIC, diversos estudios se han reportado resaltando el rol de las poblaciones sésiles en los daños localizados de diferentes materiales. Según se constituyan estas poblaciones, las interacciones en la interfaz del metal pueden ser más agresiva o no. Por lo tanto, se han caracterizado dos procesos muy bien definidos en MIC (Beech & Gaylarde, 1999), dados a continuación:

1. Formación de pequeñas áreas catódicas por productos de corrosión. Tal es el caso de la formación de sulfuros de hierro (Fe_3S_4) inducida por bacterias productoras de H_2S . Entre las más conocidas están las reductoras de sulfato (SRB del Inglés Sulphate Reducing Bacteria).

2. Creación de celdas diferenciales de concentración, por la localización de biopelículas cuya composición mantiene un microhábitat superficial heterogéneo con pH, potencial redox, concentraciones químicas diferentes al entorno interfacial.

Igualmente es importante destacar que aunque en la MIC suelen destacarse estudios con SRB, éstos no son los únicos grupos productores de H_2S , ni los únicos participantes en la interacción y coexistencia de Biopelículas, menos en medios naturales, cuya diversidad microbiológica ha sido debidamente reconocida por diferentes investigaciones (Duque et al. 2004).

Los cultivos bacterianos utilizados en este estudio, proceden de cepas aisladas de poblaciones sésiles desarrolladas en probetas de aluminio extraídas de un muelle del Lago de Maracaibo (Castellanos & Duque, 2012). Se dispuso de dos tipos de cultivos con bacterias heterótrofas quimioorganótrofas: uno con reductoras de sulfato (SRB) y el otro con no reductoras (THB: Total Heterotrophic Bacteria). El primer grupo es productor de H_2S , por desasimilación del sulfato y el segundo grupo produce ácidos orgánicos.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento corrosivo de la AA 3003 en medios bacterianos anaerobios, para apoyar los estudios que se están realizando sobre la aplicabilidad de esta aleación en embarcaciones de transporte lacustre, específicamente en el Lago de Maracaibo, cuenca hidrográfica con características particulares en su biodiversidad, por ser receptor de aguas servidas domésticas e industriales, además de sufrir un proceso de salinización por el dragado del canal de navegación, así mismo, es enriquecida en un 80% con aguas dulces de los ríos provenientes del occidente y cordillera andina (Rivas et al. 2009).

TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Para el desarrollo experimental se utilizaron técnicas electroquímicas y microscópicas. En las primeras se empleó una celda convencional de tres electrodos (Figura 1). El electrodo de trabajo consistió en una sección circular ($0,39 \text{ cm}^2$) de la AA 3003 soldada a un cable de cobre y embutido en frío con resina epóxica.

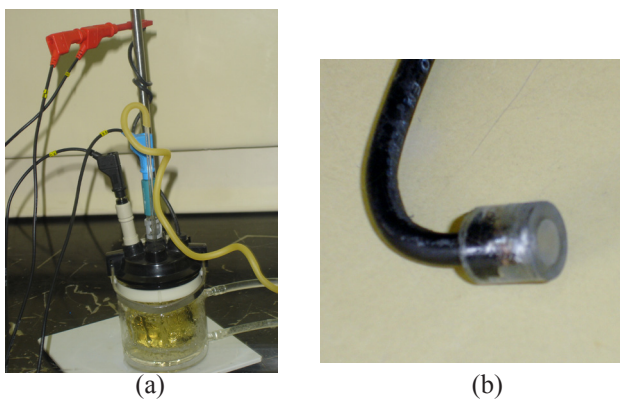


Figura 1. Celda electroquímica convencional (a). Electrodo de trabajo (b)

La preparación superficial del electrodo se llevó a cabo con papel de carburo de silicio desde 600 hasta 2000 grit. El electrodo de referencia utilizado fue Ag/AgCl y como electrodo auxiliar una barra de platino. Los tres electrodos se sometieron a desinfección exponiéndolos a etanol absoluto y ultrasonido y, posteriormente, fueron expuestos a luz germicida (UV) por 12 horas, en una cabina de bioseguridad, antes de la instalación del sistema experimental en la misma. Todos los demás materiales fueron esterilizados al vapor con Autoclave (121°C y 15 psi). Para el armado de la celda se usaron guantes estériles. Así mismo, las áreas de trabajo fueron desinfectadas con etanol absoluto y luego expuestas a UV. Todos los procedimientos de asepsia fueron desarrollados tanto antes como después de cada ensayo.

Para el estudio electroquímico se utilizó un Potenciostato/Galvanostato/Fra Autolab 30N con el software NOVA 1.8. Las técnicas aplicadas consistieron en potencial a circuito abierto (OCP del Inglés Open Circuit Potential), espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS del Inglés Electrochemical Impedance Spectroscopy) y Resistencia a la polarización (R_p , tanto en Inglés -Polarization Resistance- como castellano, técnicamente se utiliza esta sigla). En paralelo, se evaluó la formación de biopelícula sobre probetas de AA 3003, en diferentes tiempos utilizando microscopía electrónica de barrido en un equipo Quanta 200 FE-ESEM, dado que era necesario evidenciar las aglomeraciones celulares durante el tiempo del ensayo.

El electrolito utilizado fue el medio de cultivo bacteriano Postgate C modificado (lactato de sodio: 5,47 g/l, extracto de levadura: 1 g/l, citrato de sodio.2H₂O: 0,3 g/, KH₂PO₄: 0,5, NH₄Cl: 1 g/l, Na₂SO₄: 4,5 g/l, CaCl₂.6H₂O: 0,06 g/l, MgSO₄.7H₂O: 0,06 g/l). El sulfato ferroso fue excluido en la elaboración del medio electrolítico para garantizar que

no se promoviera la formación de pares galvánicos por precipitados metálicos, ajenos a la interacción de la AA 3003 con el metabolismo bacteriano. El agua empleada para la preparación del medio fue extraída del Lago de Maracaibo (pH: 7,4, conductividad: 4.288 μ S/cm, Cl⁻: 1.354 mg/l) específicamente del muelle sur (San Francisco-Zulia), con la finalidad de mantener la composición iónica del medio lacustre de interés y fue previamente filtrada para remover los microorganismos.

Las cepas bacterianas utilizadas fueron extraídas de la biomasa que se desarrolló sobre la AA 3003, luego de 15 días de inmersión en el muelle (Castellanos & Duque, 2012). Los cultivos de SRB y HTB se realizaron separadamente, hasta la fase exponencial de cada uno, para disponer de los mismos en cada uno de los ensayos.

La evaluación electroquímica de la AA 3003 se hizo en un periodo de tres días de exposición continua a los cultivos bacterianos. La actividad microbiológica se siguió microscópicamente cada 24 h (1, 2 y 3 días) para determinar la formación y persistencia o no de biopelícula durante tres días. Una vez culminada la evaluación de biopelícula por ESEM en los cupones a diferentes tiempos (1, 2 y 3 días), se realizó el decapado siguiendo la norma ASTM G1-03, para observación de los posibles daños locales en las mismas. Los ensayos fueron realizados en medios desaireados con un burbujeo continuo de nitrógeno de alta pureza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas obtenidas del potencial a circuito abierto (Figura 2), indican que en el medio estéril existe una tendencia termodinámica mucho más activa (potencial más negativo) que en el medio con SRB, mostrando una tendencia en el tiempo a mantenerse en torno a -800 mV vs $E_{Ag/AgCl}$. En presencia de actividad bacteriana de las HTB se registró una tendencia alrededor de -900 mV vs $E_{Ag/AgCl}$. En el medio con SRB, el potencial se mantiene en intervalos más nobles que los anteriores (de -600 a -800 mV vs $E_{Ag/AgCl}$ con tendencia a estabilizarse en -750mV vs $E_{Ag/AgCl}$).

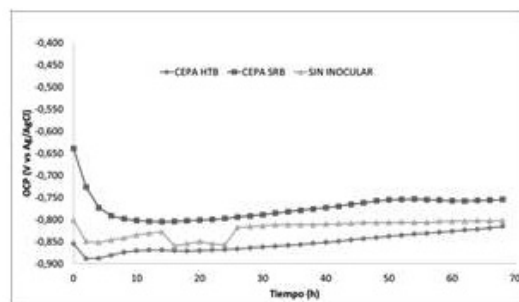


Figura 2. Curvas OCP de la AA 3003 expuesto a tres electrolitos diferentes por 70 h

Estas diferencias pueden deberse a que ambas cepas generan procesos metabólicos diferentes. Al respecto, estudios de aleaciones de aluminio a diferentes pH reportan potenciales -464 mV vs $E_{Ag/AgCl}$ en medios ácidos y con potenciales cercanos a -764 mV vs $E_{Ag/AgCl}$ en medios alcalinos (Abd et al. 2010), lo cual pudiera relacionarse con lo obtenido ante el medio con bacterias productoras de H_2S , según la reacción (1)



Deduciendo que la disociación del H_2S , generada por la actividad de las SRB, incide en la variación y potenciales registrados para el medio con este tipo de bacterias, por la heterogeneidad y dinámica interfacial que estos compuestos promueven.

Con respecto a los potenciales registrados por la actividad de la cepa HTB sobre el AA 3003, se encuentra una semejanza con los registrados para medio sin inocular, lo cual puede indicar que no existen variaciones significativas en las características del medio y los metabolitos generados por la actividad bacteriana, así como tampoco interacciones drásticas que modifiquen la interfaz del AA 3003. Este comportamiento se asemeja al reportado en estudios sobre aluminio en presencia de cloruros en medios alcalinos (Abd et al. 2010).

A partir de las curvas de polarización, obtenidas luego de 70 h de exposición en los medios de estudio (Figura 3), se determinaron los parámetros cinéticos promedio de la pendiente Tafel del AA 3003 (Tabla 1), a partir de los cuales se deduce que, en medio estéril, esta aleación se corroe más rápido que en presencia de los medios bacterianos utilizados. Éstos, a su vez, muestran diferencias leves entre sí, lo cual se contrapone con la termodinámica, cuya diferencia es más significativa.

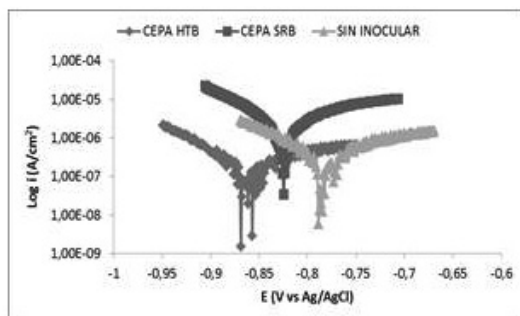


Figura 3. Curvas de Polarización de la AA 3003 expuesta a tres electrolitos diferentes por 70 h

Tabla 1. Parámetros cinéticos de la AA3003 a 70 h de exposición en diferentes medios

| PARÁMETRO | SIN INOCULAR | CULTIVOS BACTERIANOS | |
|------------------------------------|--------------|----------------------|----------|
| | | HTB | SRB |
| ba(V/dec) | 0,0275 | 0,0471 | 0,0330 |
| bc (V/dec) | 0,0287 | 0,0770 | 0,00704 |
| Ecorr(V) | -0,780 | -0,863 | -0,825 |
| i corr (A/cm²) | 4,50E-07 | 2,30E-07 | 1,79E-02 |
| Vcorr (mm/year) | 0,015 | 0,008 | 0,019 |
| Resistencia a la Polarización (KΩ) | 55,35 | 141,43 | 8,759 |

De los parámetros obtenidos, puede observarse que las diferencias entre sí, de la velocidad de corrosión (V_{corr}) a las 70 h, en ambos cultivos bacterianos se encuentran en el mismo orden exponencial (10^{-3} mpy). Para un mayor detalle se presenta el valor inverso de la R_p vs tiempo (Figura 4), representando así el comportamiento corrosivo de la AA 3003 en estudio. Resulta relevante destacar que la diferencia principal en la V_{corr} se encuentra en las primeras 8 h de inmersión, describiendo un inicio agresivo tanto en el medio con las HTB como con las SRB, pero con una drástica disminución, lo cual se puede asociar con la formación de la barrera protectora del aluminio y de posible adsorción de los compuestos orgánicos metabólicos, característicos de estos medios microbiológicos. La tendencia es hacia valores prácticamente similares a los del medio sin inocular, en el caso de las HTB y a valores superiores en el medio con SRB.

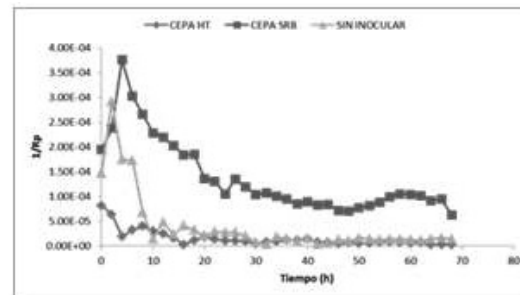


Figura 4. $1/R_p$ de la AA 3003 vs tiempo para diferentes medios de evaluación

Los análisis con EIS, permiten describir el comportamiento resistivo de la AA 3003 inmersa durante 70 h en los tres medios estudiados, mostrando una resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) baja en el medio estéril, comparada con los valores obtenidos en el medio inoculado con HTB, y alta respecto a los medios con SRB (Figura 5), sugiriendo que la actividad de la SRB induce una mayor

actividad interfacial en la AA 3003, debido a la reacción (1).

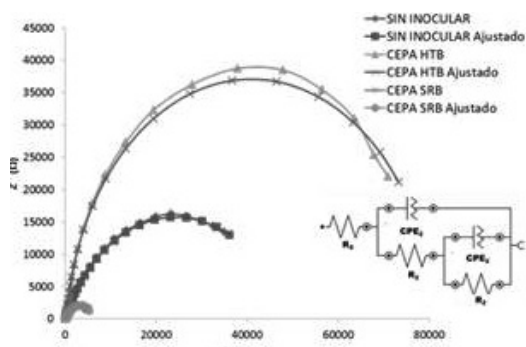


Figura 5. Diagrama de Nyquist, y circuitos equivalentes de la AA 3003 a 70 h de exposición

La disgregación de las diferentes resistencias deducidas de los circuitos equivalentes constituidos por tres resistencias y dos elementos de fase constante, en los ajustes de las curvas de Nyquist para 70 h de exposición, se observan en la Tabla 2, resaltando cómo la resistencia del medio con cultivo de SRB es la más baja tanto en el electrolito (R_s) como en interfaz (R_2), indicando una mayor incidencia sobre la AA 3003 que las HTB. Asumiendo por analogía del comportamiento físico a R_2 como la resistencia de la película protectora del aluminio. Todo esto, evidencia diferencias en su conformación al cabo de 70 h de exposición, observándose una mayor protección en el caso de medio con HTB y menor en el caso de las SRB, con respecto al medio sin inocular.

Tabla 2. Parámetros de EIS en la AA3003 a 70 h de exposición en diferentes medios

| Resistencias | Medio sin inocular | Cultivos bacterianos | |
|---------------------|--------------------|----------------------|-------|
| | | HTB | SRB |
| R_s (Ω) | 32,7 | 111 | 68,1 |
| R_1 ($k\Omega$) | 22 | 35,4 | 0,239 |
| R_2 ($k\Omega$) | 26,7 | 46,2 | 5,94 |

En todos los casos, los valores de resistencia correspondientes a la capa interna próxima al aluminio (R_2) son mayores que los de la capa externa (R_1), lo cual puede asociarse con una estructura porosa y desordenada de ésta, debida a la influencia de los microorganismos, con base en lo reportado en investigaciones sobre aleaciones de aluminio expuestas a diferentes cultivos de microorganismos por tiempos prolongados (Juzeliūnas et al. 2005).

Sin embargo, la evidencia microscópica de la presencia bacteriana en las superficies de la AA 3003, permitió determinar escasas células adheridas (Figura 6). Por lo

tanto, no se registra biopelícula de ninguno de los cultivos en los tiempos evaluados. En el caso de las SRB, esto pudiera estar asociado con la toxicidad del H_2S a la misma población celular. Por consiguiente, se deduce que la principal influencia en los procesos resistivos detectados se debe a los metabolitos generados en el medio, los cuales se describen como productos poliméricos. Esta inferencia se apoya en otras discusiones de datos obtenidos con EIS, los cuales revelan una estructura de doble capa con la existencia de óxido natural y de una capa resultante de los productos generados por el metabolismo de los microorganismos presentes en el medio (Juzeliūnas et al. 2005).

Igualmente, si se observa la superficie antes de la exposición a los cultivos (Figura 7) así como las expuestas, luego de ser debidamente decapadas (Figura 8), se logra evidenciar la influencia de los medios sobre el material en ausencia de biopelículas, debido a la presencia de leves picaduras, diferenciándolas de los defectos superficiales del material.

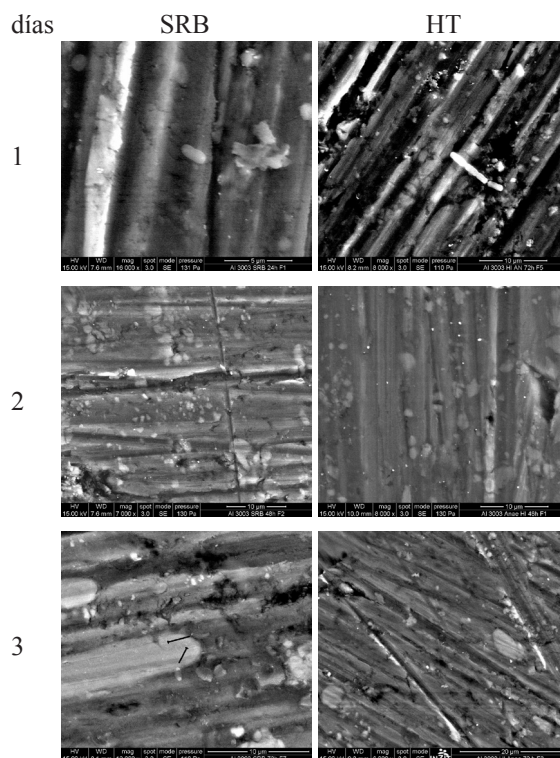


Figura 6. Micrografías de la AA 3003 expuesto a cultivos bacterianos en diferentes tiempos

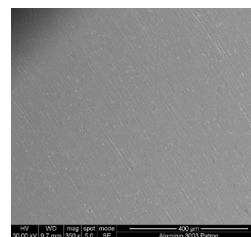


Figura 7. Micrografía de la AA 3003 antes de ser expuesto

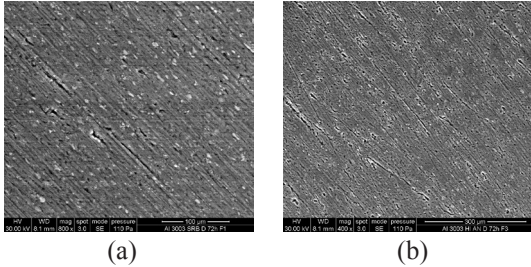


Figura 8. Micrografías de la AA 3003 decapado luego de 70 h de exposición a los cultivos bacterianos.
(a) SRB y (b) HTB

Todos los resultados antes detallados, permiten deducir que las diferencias electroquímicas detectadas pueden estar relacionadas, principalmente, con la química del electrolito (Cl^-), además del aporte de H_2S en el caso de las SRB. Tal como se indicó anteriormente, no hubo formación de biopelículas, por lo cual la interacción continua con el material habría de ser de los iones agresivos presentes sobre la película estable.

Con base en lo reportado por otros investigadores, la reacción de corrosión conduce a la formación de óxidos/hidróxidos del aluminio, edificando sobre el metal una película de óxido con presencia de defectos, los cuales pueden actuar como nuevos sitios de nucleación para la formación de picaduras, con la consiguiente ruptura de la película pasiva (De Vega, 2011; Hollingsworth & Hunsicker, 1997). Este nuevo escenario indicaría la formación y repasivación de defectos, en competencia con los iones agresivos. Éstos y la ausencia de oxígeno del medio dificultan el proceso de repasivación, promoviendo picaduras. Estos autores señalan que la ruptura de la capa pasiva podría ocurrir mediante: a) La penetración de iones agresivos a la base de los defectos, bien en forma de iones complejos de corta vida, o bien por el desarrollo de islas de sales ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) que sufran una disolución posterior (Wu et al. 1999). b) Mediante un descenso local del pH a valores tan bajos que eliminaran los productos protectores generados en el defecto superficial, exponiendo el aluminio al medio agresivo en forma cíclica.

CONCLUSIONES

En condiciones de anaerobiosis con cloruros y bacterias, la AA 3003 expuesta durante 70 h, igualmente forma una barrera protectora, que disminuye drásticamente la velocidad de corrosión inicial; sin embargo, se afecta localmente debido a la agresividad del ion cloruro, principalmente, el cual incidió en el desarrollo de picaduras, características de materiales pasivos, con leves diferencias entre los medios evaluados.

AGRADECIMIENTO

Al FONACIT por el financiamiento de este proyecto, N°: 2011001091 denominado “Diseño, desarrollo y caracterización de aleaciones de Aluminio nacional para su diversificación en aplicaciones de transporte lacustre expuesto a medios con alta incidencia biológica”. Al Lcdo. Ricardo Morales del INZIT, por su valiosa colaboración con el SEM.

REFERENCIAS

- ABD EL/WAHAB, E.A., MARET A.H., KHALIFA O.R., MOHAMED, H.A. (2010). Corrosion Behaviour of Aluminum Electrode in absence and presence of sodium chloride different pH solutions using toluidine as inhibitor. *Journal of American Science*.
- BEECH, I. & GAYLARDE, CH. (1999). Recent Advances in the Study of Biocorrosion – An Overview. *Revista de Microbiología*. Vol.30 n.3 São Paulo July/Sept. 1999.
- CASTELLANOS C., M. I. & DUQUE, Z. (2012). SEM en estudio corrosivo del Al 3003 expuesto a medio heterotrófico. *Acta microscópica*, Vol 21, supp A, 117. Memoria. XV Congreso Venezolano de Microscopía y Microanálisis. Santa Ana de Coro, 2012.
- DE VEGA V., J. M. (2011). Mecanismos de protección anticorrosiva del aluminio mediante recubrimientos de pintura formulados con pigmentos de intercambio iónico. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- DUQUE, Z., CHICOTE, E., SARRÓ, M. I., MORENO, D., ROMERO, M., PÉREZ, O. (2004). Corrosivity of H_2S -producing bacteria isolated from formation waters used in secondary crude-oil recovery *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia* Vol. 27 n.2 Maracaibo ago.
- HOLLINGSWORTH, E. H. & HUNSICKER, H. Y. (1997). Corrosion of aluminum and aluminum alloys. *ASM Handbook*. Vol. 13. Corrosion. ASM International, pp. 583-609.
- JUZELIŪNAS E., RAMANAUSKASA, R., LUGAUSKASB, A., SAMULEVIÈIENĒA, M., LEINARTASA, K., IVAŠKEVIĒA, E., PEĒIULYTĒB, D. (2005). Investigation of microbiologically influenced corrosion 3. Two-year exposure of aluminium to *Penicillium frequentans*, *Aspergillus niger* and *Bacillus mycoides*. *CHEMIJA*. T. 16. Nr. 2. P. 12–17.

- ORNEK, D., JAYARAMAN, A., SYRETT, B.C., HSU, CH., MANSFELD, FB., WOOD, TK. (2002). Pitting corrosion inhibition of aluminum 2024 by Bacillus biofilms secreting polyaspartate or gamma-polyglutamate. Applied Microbiology and Biotechnology. April, Volume 58, Issue 5, pp 651-657.
- PAREDES-DUGARTE, S., VIDAL-PRADA, B., ÁVILA-GODOY, R., BRICEÑO-VALERO, M. (2007). Study of pitting corrosion of the commercial aluminium alloy AA3003 in saline environment. Revista Técnica de Ingeniería, Universidad del Zulia. p. 168 - 177.
- RIVAS, Z., SÁNCHEZ, J., TRONCONE, F., MÁRQUEZ, R., LEDO DE MEDINA, H., COLINA, M., GUTIÉRREZ, E. (2009). Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema Lago de Maracaibo, Venezuela. Interciencia Mayo, Vol. 34 N° 5. Disponible en: <http://www.scielo.org.ve/pdf/inci/v34n5/art04.pdf>
- SMIRNOV, V.F., BELOV, A.V., SOKOLOVA, T.N., KUZINA, O.V., KOVASHOV, R. (2008). Microbiological corrosion of aluminum alloys Applied biochemistry and Microbiology. Vol. 44, No. 2, pp. 192/196.
- WU, X.L., LIU, J.H., CHEN, X.Y. (1999). Surface analysis of aluminum alloys influenced by sulfate-reducing bacteria. Acta Metallurgica sinica. Vol. 12, No.5. pp 867-873.