



ANÁLISIS DE FALLA EN TUBOS DE ALUMINIO ANODIZADO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR MEDIANTE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

G. K. Pedraza Basulto¹, A. Borunda Terrazas¹, F. Almeraya Calderón¹, J. A. Cabral Miramontes², A. Martínez Villafañe¹, J G. Chacón Nava¹.

¹Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV),
Departamento de Integridad y Desarrollo de Materiales Compuestos/ Grupo Corrosión, Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, Chih., México.

²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Querétaro. Libramiento Norponiente No. 2000, Fracc. Real de Juriquilla. C.P. 76230 Querétaro, Qro. México.

E-mail ^{1*}: gabriela.pedraza@cimav.edu.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados del análisis del deterioro de tubos utilizados en intercambiadores de calor de aluminio anodizado, mediante técnicas electroquímicas. Una de las aplicaciones de este tipo de intercambiadores es con fines médicos, por ello la importancia del apropiado comportamiento de dichos materiales. Se estudiaron 3 muestras de aluminio anodizado, efectuándose pruebas de corrosión utilizando diferentes soluciones: agua de mar sintética [1], solución Ringer [2], y agua destilada como medio de comparación, a temperatura ambiente. Se empleó la prueba electroquímica de curvas cíclicas de polarización utilizando un potenciostato/galvanostato, en una celda electroquímica de picado, con un arreglo de 3 electrodos. El estudio se complementa mediante Estereoscopia Óptica. Los resultados indican que las velocidades de corrosión (en mm/año) son muy bajas para el agua destilada y mayores para los otros dos medios estudiados.

Palabras Claves: Aluminio anodizado, Agua de mar sintética, curvas cíclicas de polarización.



1. INTRODUCCIÓN

Los materiales, dispositivos y equipos médicos comprenden una amplia variedad de productos, que van desde materiales y dispositivos desechables hasta equipos activos implantables de alto riesgo médico. De manera general, estos productos se clasifican como *medical devices* en la literatura en idioma inglés, mientras que en castellano se utilizan diferentes términos, tales como: equipos médicos en Cuba (Centro de Control Estatal de Equipos Médicos, 2011) [3]; producto médico en la normativa de Buenas Prácticas de Fabricación (BPF) de MERCOSUR (1995) [4]; y productos sanitarios en la normativa europea en castellano, específicamente, en España (Comisión Europea, 1993) [5]. De acuerdo a lo establecido por la regulación sanitaria internacional, el comportamiento de un producto médico debe responder a las exigencias de desempeño, eficacia y seguridad al ser utilizados [6], por lo que el adecuado uso de los materiales de fabricación para estos equipos tiene crucial importancia. Algunas propiedades de las aleaciones de aluminio serie 3xxx son su alta resistencia estructural, alta conductividad térmica, sustituto de materiales pesados, particularmente en partes automotrices, así como su resistencia a la corrosión [7], sin embargo en algunos casos y debido al proceso de anodizado se sabe que ante soluciones con contenidos de cloro y sales presentan un comportamiento de auto sello en los poros existentes, debido a los productos de corrosión que se generan [8]. Una de sus aplicaciones, es en intercambiadores de calor, reemplazando a materiales tales como aceros inoxidable y aleaciones de cobre [9-10]. El objetivo de este estudio, es determinar la velocidad de corrosión y el comportamiento electroquímico de los intercambiadores de tubo de aluminio anodizado empleados para transportar fluidos de tipo biológico, mediante la técnica de Curvas Cíclicas de Polarización (CCP).

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se toman 3 muestras de aluminio anodizado, tal como se muestra en la Figura 1, efectuando pruebas de corrosión utilizando 3 diferentes soluciones de acuerdo a la Tabla I.



Figura 1. Tubos de aluminio anodizado

2.1. Caracterización Electroquímica

Para realizar la caracterización electroquímica se llevaron a cabo las siguientes actividades:

1. Selección y corte de muestras del tubo de aluminio.
2. Montaje y preparación de muestras embebidas en resina.
3. Medición de la velocidad de corrosión en el Laboratorio de Corrosión y Protección.

El equipo utilizado para llevar a cabo la prueba fue el siguiente:

- Equipo de corrosión (potenciostato/galvanostato/ZRA), Gill 8AC de ACM Instruments

2.1.1. Sistema Electroquímico

Se empleó la técnica electroquímica de curvas cíclicas de polarización utilizando un potenciostato/galvanostato, en una celda electroquímica de picado con un arreglo de 3 electrodos, como se aprecia en la Figura 2, el electrodo de trabajo es el tubo anodizado embebido en resina (A), el electrodo de referencia utilizado es Ag/AgCl (B), y como electrodo auxiliar un electrodo de platino (C).



Figura 2. Celda de picado con un arreglo experimental de tres electrodos.

Tabla I. Parámetros de experimentación utilizados

Medio	Parámetros empleados	Técnica
Agua destilada	-500 a 1500 mV a partir del E_{corr} / Velocidad de barrido 60 mV/min	Curva de Polarización Cíclica
Agua de Mar Sintética	-500 a 1500 mV a partir del E_{corr} / Velocidad de barrido 60 mV/min	Curva de Polarización Cíclica
Solución Ringer	-500 a 1500 mV a partir del E_{corr} / Velocidad de barrido 60 mV/min	Curva de Polarización Cíclica

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla II presenta un condensado de los parámetros electroquímicos encontrados para las pruebas realizadas en los diferentes medios utilizados en la experimentación, en donde se observan los potenciales de corrosión (E_{corr}), potencial de nucleación y picado (E_{np}) y la velocidad de corrosión (V_{corr}), se puede observar los valores de los parámetros para el agua destilada son menores, seguido del agua de mar Sintética y por último la solución Ringer, mostrando valores más grandes en los tres parámetros respectivamente.

En la Figura 3, se observa que a partir de potencial de corrosión en el comportamiento anódico, existe un proceso de activación-pasivación espontánea, debido a que la densidad de corriente varía solo una década en la región de activación, sin embargo existe una zona de transición donde sin variación del potencial hay una demanda en la densidad de corriente (región pasivación), lo cual se atribuye a la formación de una película pasiva, seguido a un segundo proceso de activación, a partir de Potencial de reversa, se desarrolla una histéresis negativa (dentro de la curva), regresando a valores menores del potencial de corrosión..

En la Figura 4, debido a que el potencial de protección se encuentra cercano al potencial de corrosión, el daño localizado se detendrá al regresar al equilibrio o cuando el material se

encuentre protegido catódicamente, además la amplitud del lazo de histéresis denota alta tendencia a daño localizado.

Para el caso de la Figura 5, en el la polarización del comportamiento anódico observamos una región muy activa con una alta demanda de corriente precedida de una tendencia a la disminución de la corriente, lo cual es indicativo de la formación de una película pasiva, el lazo de histéresis es menor en comparación con la muestra en agua de mar Sintética, lo cual significa un menor daño localizado.

En la Figura 6 se observa que el potencial de corrosión de la muestra en agua de mar Sintética presenta el potencial más electronegativo de -887 mV mientras que en agua destilada el potencial es de -595 mV.

Tabla II. Resultados electroquímicos de las curvas de polarización cíclicas.

Medio	E_{corr} (mV vs Ag/AgCl)	E_{np} (mV vs Ag/AgCl)	V_{corr} (mm/año)
Agua Destilada	-595.0	170	6.17 E-7
Agua de Mar Sintética	-887.0	-600	6.53 E-4
Solución Ringer	-695.0	-650	4.68 E-4

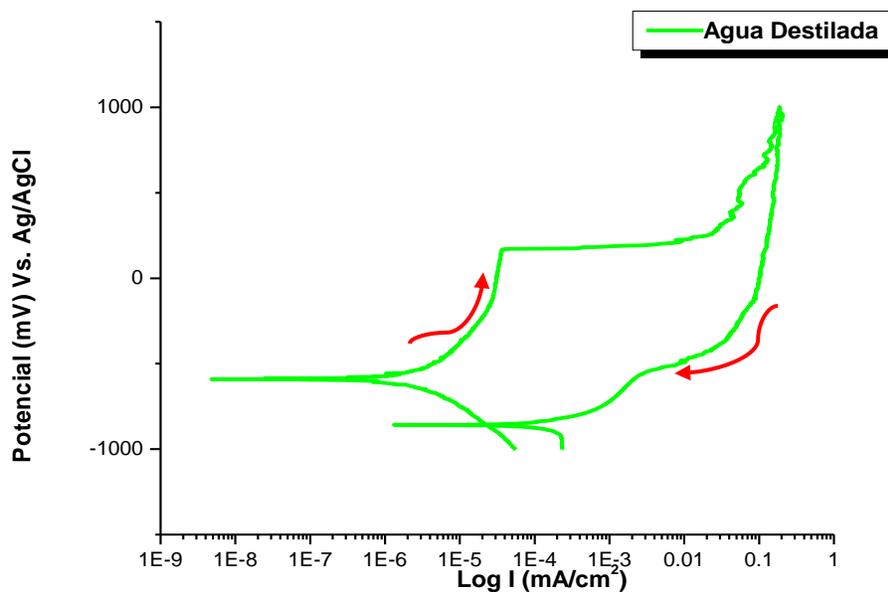


Figura 3. Comportamiento de la muestra de tubo anodizado inmersa en una solución de agua destilada durante la prueba electroquímica de curva de polarización cíclica

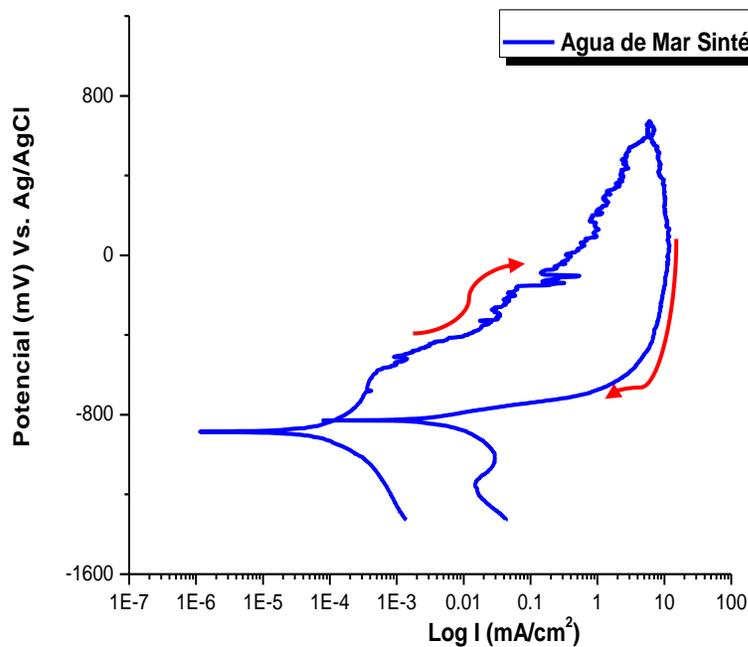


Figura 4. Comportamiento de la muestra de tubo anodizado inmersa en una solución de mar Sintética durante la prueba electroquímica de curva de polarización cíclica.

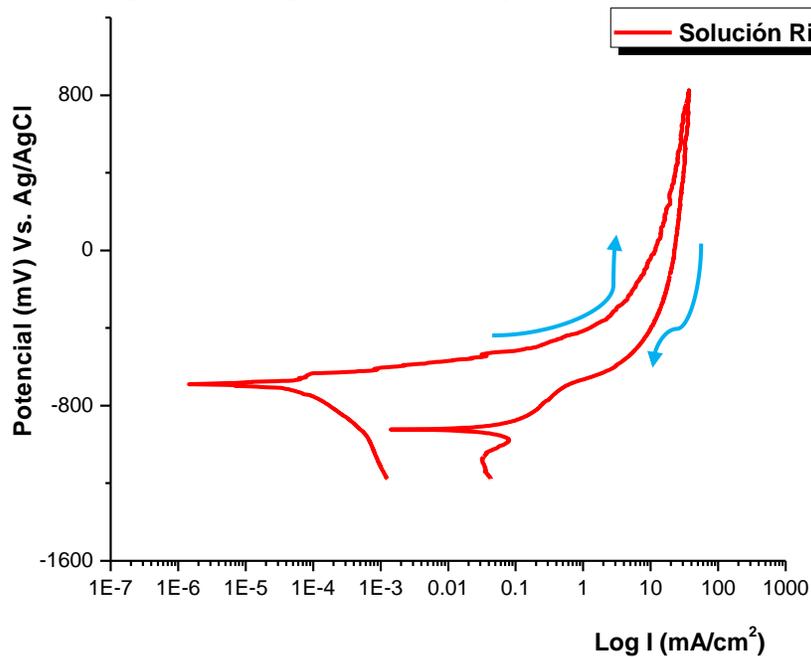


Figura 5. Comportamiento de la muestra de tubo anodizado inmersa en una solución Ringer durante la prueba electroquímica de curva de polarización

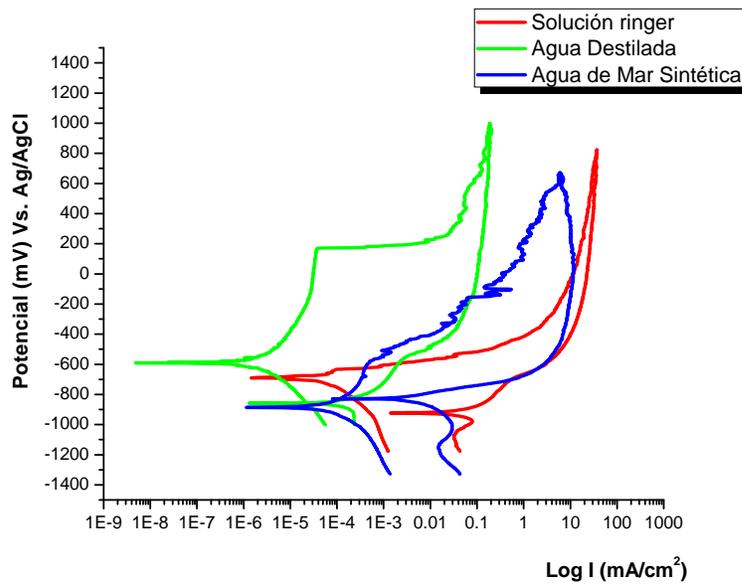
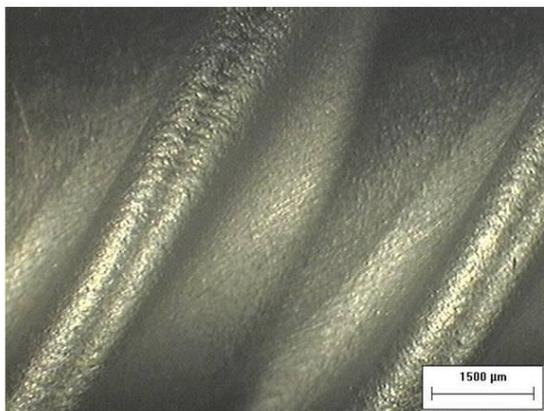


Figura 6. Comportamiento de la muestra de tubo anodizado inmersa en los tres electrolitos, durante la prueba electroquímica de curva de polarización.

Con la finalidad de establecer una relación entre los resultados obtenidos por la técnica electroquímica y la morfología de las muestras, una vez terminado el ensayo se hace uso de la microscopía óptica. En la Figura 7, correspondiente a la experimentación en agua destilada, se puede observar, que no se tiene formación visible de picado en la superficie del tubo, salvo un ligero manchado sobre la superficie de un espiral (Twist).

AGUA DESTILADA



Detalle de morfología de ataque a 7X.



Detalle de morfología de ataque a 10X.

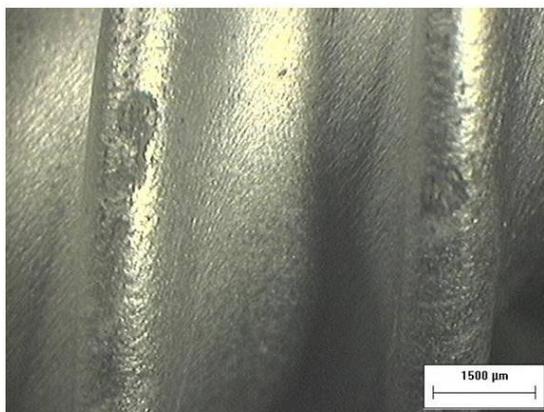
Figura 7. Morfología de superficie después de la exposición en agua destilada

En la Figura 8, correspondiente a la experimentación en agua de mar Sintética, se observa daño localizado severo en la superficie de los espirales (Twist), evidenciando los resultados obtenidos mediante la técnica electroquímica utilizada (CPC).

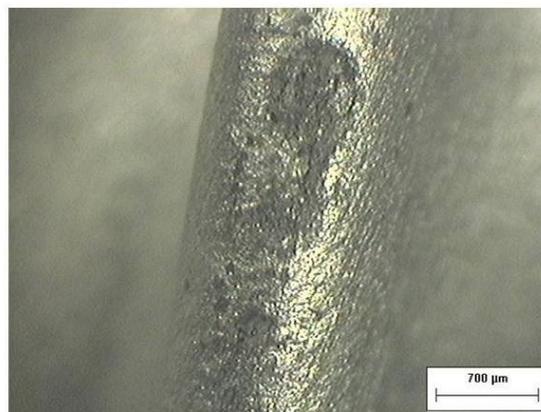
En la Figura 9, correspondiente a la experimentación en solución Ringer, como en el caso anterior, se observa daño localizado en menor proporción en la superficie de los espirales (Twist), lo cual coincide con los resultados obtenidos mediante la técnica electroquímica utilizada (CPC).

En la Figura 10, correspondiente únicamente a la superficie de los tubos sin exposición, tal y como fueron enviados, se observa una superficie sin ninguna alteración o tipo de falla causada por corrosión.

AGUA DE MAR SINTÉTICA



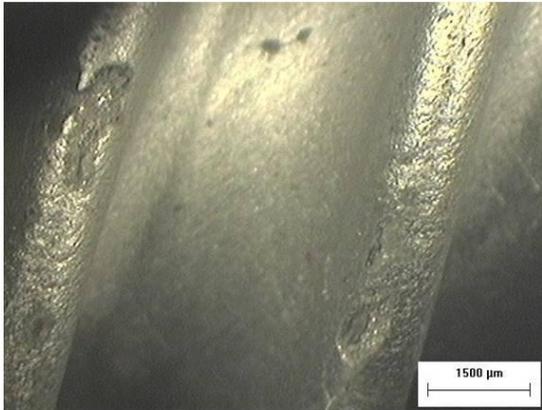
Detalle de morfología de ataque a 7X



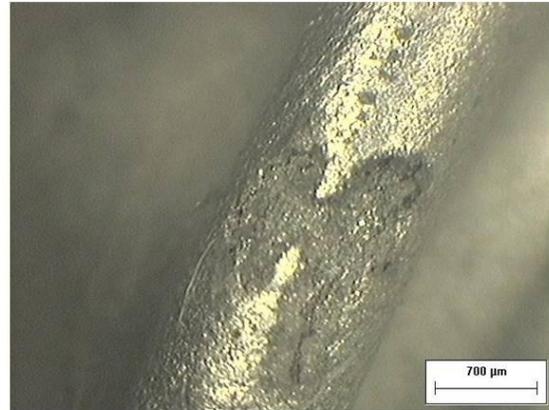
Detalle de morfología de ataque a 15X

Figura 8. Morfología de superficie después de la exposición en agua de mar Sintética

SOLUCIÓN RINGER



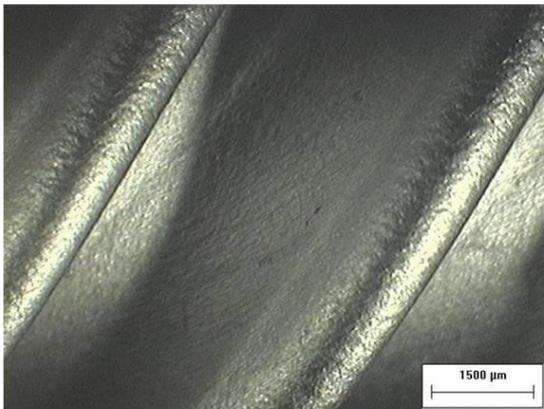
Detalle de morfología de ataque a 7X.



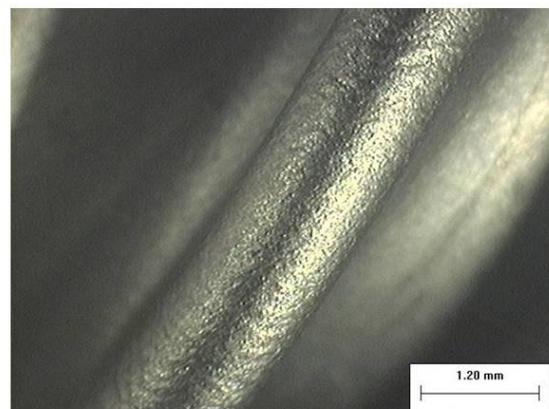
Detalle de morfología de ataque a 15X.

Figura 9. Morfología de superficie después de la exposición en solución Ringer.

SIN EXPOSICIÓN



Detalle de morfología de ataque a 7X.



Detalle de morfología de ataque a 10X.

Figura 10. Morfología de superficie de las muestras tal y como se recibieron.

4. CONCLUSIONES

Las soluciones de agua de mar Sintética y Ringer mostraron, en ambos casos, mayor susceptibilidad a la corrosión por picaduras, que la mostrada por el agua destilada utilizada como medio de comparación.

De acuerdo a los parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización cíclica, se observa que los valores de E_{corr} , E_{np} dan indicio de un comportamiento activo del material en estudio, tanto la solución de agua de mar sintética como en la Ringer mostraron, en ambos casos; un potencial mayor tanto de corrosión como nucleación de picado, evidenciando mayor activación y susceptibilidad a daño por corrosión localizada.

Los resultados indican que las velocidades de corrosión (en mm/año) son tres órdenes de magnitud menores para el agua destilada que para los otros dos medios estudiados.

5. REFERENCIAS

- [1] ASTM D1141-98 *Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water*, (2008)
- [2] C. Salort-Llorca, A. Planas-Giner, R. Garriga-Biosca y R. Pla-Poblador, *Servicio de Farmacia. Hospital Mútua de Terrassa*, **32**, 124, (2008).
- [3] <http://www.eqmed.sld.cu/Documentos%20Regulatorios.html>, Accesado en Febrero del 2011. Centro de Control Estatal de Equipos Médicos
- [4] <http://www.who.int/bloodproducts/gmp/en/>, accesado en Febrero del 2011. World Health Organization, Department of Quality Assurance and Safety: Medicines
- [5] http://ec.europa.eu/consumers/sectors/medical-devices/index_es.htm, accesado en febrero del 2011, European Commission, Consumers Affairs, Last Update : 10-03-2008
- [6] <http://hinfo.humaninfo.ro/gsd/healthtechdocs/>, *WHO Health Technologies e-Documentation Centre* accesado en Febrero del 2011. Organización Mundial de la Salud, (2011)
- [7] Y. Liu , G.Z. Meng , Y.F. Cheng, *Electronic structure and pitting behavior of 3003 aluminum alloy passivated under various conditions*, *Electrochimica Acta* **54**, 4155, (2009)
- [8] Yuelong Huang, Hong Shih, John Daugherty, Florian Mansfeld , *Evaluation of the properties of anodized aluminum 6061 subjected to thermal cycling treatment using electrochemical impedance spectroscopy (EIS)*, *Corrosion Science*, **51**, 2493 (2009)
- [9] G. Davies, *Materials for Automobile Bodies*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, (2003)

[10] W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge, *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry*, Materials Science and Engineering A, **280**, 37 (2000).