

## CORROSION ELECTROQUIMICA DE TUBOS DE ALUMINIO ANODIZADOS EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR.

G. K. Pedraza-Basulto<sup>1\*</sup>, A. Borunda-Terrazas<sup>1</sup>, J. A. Cabral-Miramontes<sup>2</sup>, P. Zambrano-Robledo<sup>1</sup>,  
C. Gaona-Tiburcio<sup>2</sup>, J. G. Chacón-Nava<sup>1</sup>, F. Almeraya-Calderón<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Centro 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.  
<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Facultad de Ingeniería Mecánica (FIME),  
Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA),  
Aeropuerto Internacional del Norte. Carr. Salinas Victoria Km. 23, Apodaca, N.L. México.  
E-mail <sup>1\*</sup>: [gabriela.pedraza@cimav.edu.mx](mailto: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 técnica electroquímica de curvas de polarización cíclicas (CPC). 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, efectuando pruebas de corrosión utilizando diferentes soluciones: agua de mar sintética, solución Ringer, y agua destilada como medio de comparación, a temperatura ambiente. Las pruebas electroquímicas se realizaron utilizando un potencióstato/galvanostato, una celda de picado con un arreglo de 3 electrodos. El estudio se complementa mediante microscopía 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.

### ABSTRACT

The results of the analysis of the deterioration of tubes used in heat exchangers anodized aluminum by electrochemical technique of cyclic polarization curves (CPC). One application of this type of exchanger is for medical purposes, hence the importance of the proper behavior of such materials. 3 samples were studied anodized aluminum, effecting corrosion tests using different solutions: synthetic sea water, Ringer's solution, and distilled water as a means of comparison, at room temperature. Electrochemical tests were performed using a potentiostat / galvanostat, a Critical Pitting Test Cell with a 3-electrode arrangement. The study is

complemented by optical stereoscopy. The results show that the corrosion rates (mm / year) are very low and distilled water for greater for the other two media studied.

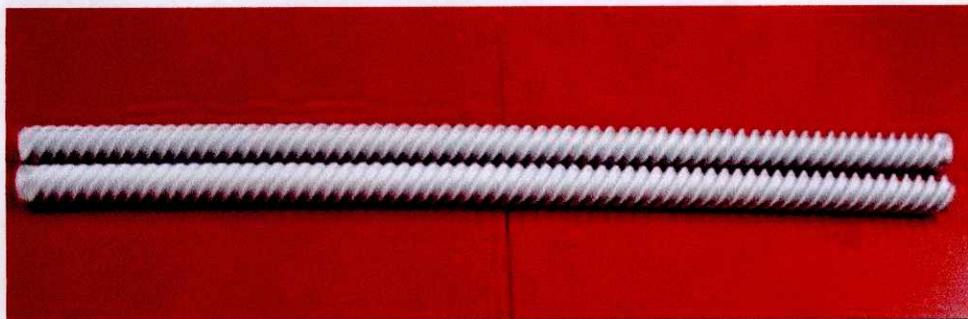
## 1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio se caracterizan por su ligereza en peso en relación a su resistencia mecánica, alta conductividad térmica, maleabilidad y su resistencia a la corrosión y en algunos casos ha sustituido al acero inoxidable y a las aleaciones de cobre, específicamente en intercambiadores de calor. Sin embargo, este tipo de aleaciones son propensas a la corrosión localizada y su resistencia a este tipo de ataque esta en función de la formación de su película pasiva.

Actualmente este tipo de aleaciones están siendo utilizadas en dispositivos y equipos médicos que comprenden una amplia variedad de productos entre ellos 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)[1]; producto médico en la normativa de Buenas Prácticas de Fabricación (BPF) de MERCOSUR (1995) [2]; y productos sanitarios en la normativa europea en castellano, específicamente, en España (Comisión Europea, 1993) [3], existen diversos organismos que regulan el comportamiento de estos dispositivos que garantizan su eficacia, seguridad y efectividad, siendo la constante en todos estos organismos que la totalidad de aspectos y características que posibilitan a un producto médico a responder a las exigencias de adecuación al uso, incluyendo la seguridad y el desempeño, es por ello que el adecuado comportamiento de los materiales de fabricación para estos equipos tienen gran importancia, motivo por el cual una adecuada valoración y análisis es crucial para este tipo de práctica. En este estudio los tubos de aluminio anodizado son aplicados en intercambiadores de calor siendo el fluido biológico el que transportan y se evalúa el deterioro por corrosión, mediante la técnica electroquímica de curvas de polarización.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

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



**Figura 1.** Tubos de aluminio anodizado

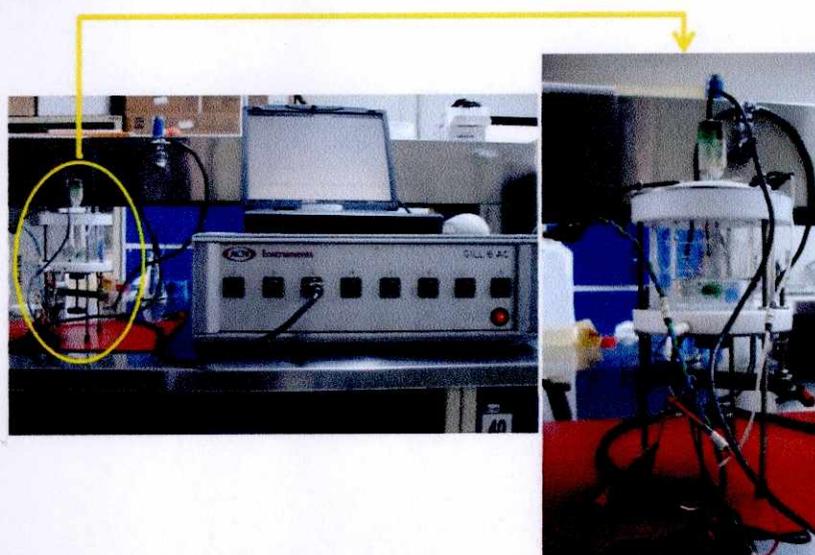
## 2.1. Caracterización Electroquímica

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

### 2.1.1. Sistema Electroquímico

Se empleó la prueba electroquímica de curvas cíclicas de polarización utilizando un potencióstato/galvanostato, en una celda de picado con un arreglo de 3 electrodos, como se observa en la figura 2.



**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	Curvas de Polarización Cíclica
Agua de Mar Sintética [4]		
Solución Ringer [5]		

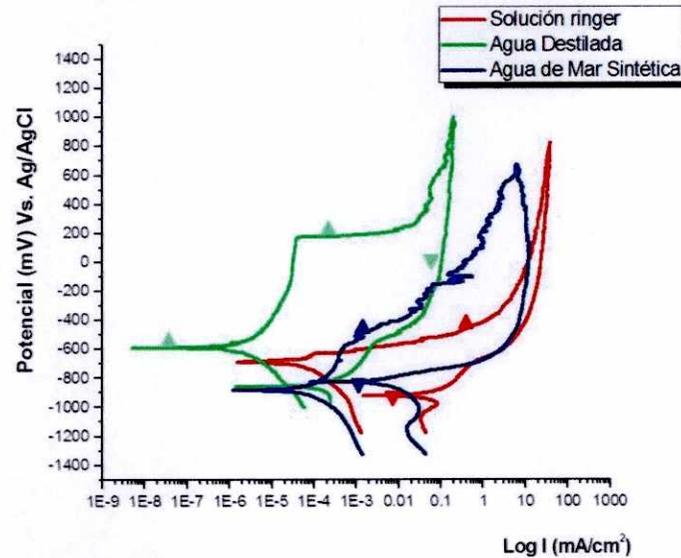
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla II presenta un condensado de los resultados de los valores electroquímicos encontrados para las pruebas realizadas en los diferentes medios utilizados en la experimentación, en donde se observan los valores de los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ), potencial de nucleación y picado ( $E_{np}$ ) y velocidad de corrosión ( $V_{corr}$ ), valores menores para el agua destilada, seguido de agua sustituto de mar y por último la solución Ringer, en los tres casos.

En la figura 3 se presentan los resultados de las curvas de polarización cíclica en las soluciones de agua de mar, solución Ringer y agua destilada. Se observa un proceso de activación con una clara tendencia a la formación de picaduras, mientras que el agua destilada muestra menor tendencia a la formación de picado, presentando una menor demanda en la densidad de corriente y una zona de pasivación.

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

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

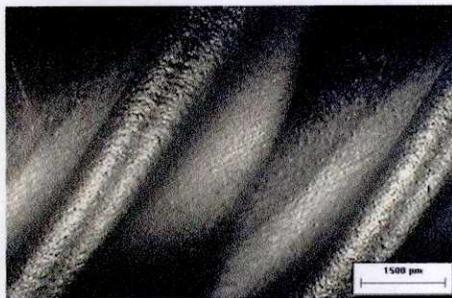


**Figura 3.** Curvas Cíclicas en los tres medios de prueba.

En la figura 3 se puede observar que la demanda de corriente menor la presenta el medio con agua destilada y el potencial de corrosión más electronegativo se encuentra en la muestra en agua de mar sintética, mientras que el proceso de activación mayor se presenta en la solución Ringer.

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 microscopía óptica. La figura 4, 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.

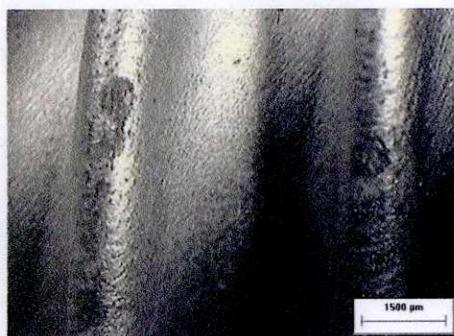
**Figura 4.** Morfología de superficie después de la exposición en agua destilada

La figura 5, corresponde a la experimentación en agua de mar, se puede observar, un visible picado en la superficie de los espirales (Twist), evidenciando los resultados obtenidos mediante la técnica electroquímica utilizada (CPC).

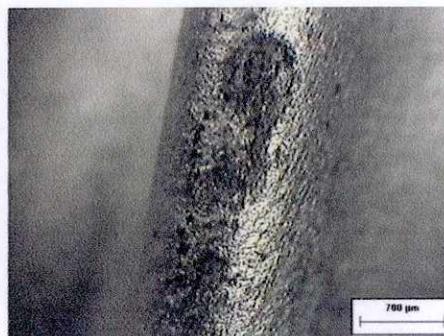
La figura 6, corresponde a la experimentación a la solución Ringer, se vuelve a observar, como en el caso anterior, un picado visible más severo en la superficie de los espirales (Twist), volviendo nuevamente a ratificar los resultados obtenidos mediante la técnica electroquímica utilizada (CPC).

La figura 7, corresponde 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 5. Morfología de superficie después de la exposición en agua mar Sintética.

## SOLUCIÓN RINGER



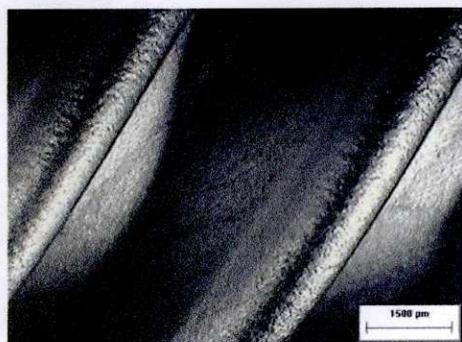
Detalle de morfología de ataque a 7X.



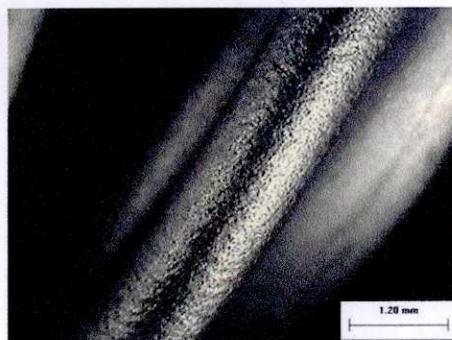
Detalle de morfología de ataque a 15X.

Figura 6. 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 7. Morfología de superficie de las muestras tal y como se recibieron.

### 4. CONCLUSIONES

- Las soluciones de agua de mar y la 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 la Ringer mostraron en ambos casos un potencial mayor tanto de corrosión como nucleación de picado, teniendo mayor activación.
- 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] <http://www.eqmed.sld.cu/Documentos%20Regulatorios.html>, Accesado en Febrero del 2011. Centro de Control Estatal de Equipos Médicos
- [2] <http://www.who.int/bloodproducts/gmp/en/>, accesado en Febrero del 2011. World Health Organization, Department of Quality Assurance and Safety: Medicines
- [3] [http://ec.europa.eu/consumers/sectors/medical-devices/index\\_es.htm](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
- [4] ASTM D1141-98 *Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water*, (2008)
- [5] C. Salort-Llorca, A. Planas-Giner, R. Garriga-Biosca y R. Pla-Poblador, *Servicio de Farmacia. Hospital Mútua de Terrassa*, **32**, 124, (2008).