

Capítulo 2

Corrosión en la industria aeroespacial

C. Gaona Tiburcio,¹ P. Zambrano Robledo,¹ A. Martínez Villafañe,² F. Almeraya Calderón¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, FIME. Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, CIIA. Carretera a Salinas Victoria Km. 2.3, Aeropuerto Internacional de Norte. Apocada, Nuevo León, México.

² Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua. Chihuahua, Chih., México.

citlalli.gaona@gmail.com

Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.77>

Referenciar este capítulo

Gaona Tiburcio C, Zambrano Robledo P, Martínez Villafañe A, Almeraya Calderón F. *Corrosión en la industria aeroespacial*. En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). *Corrosión y preservación de la infraestructura industrial*. Barcelona, España: OmniaScience; 2013. pp. 33-48.

1. Introducción

Los Estados Unidos son el principal país en la industria aeronáutica, generando ingresos por 204 mil millones de dólares, el 45.3% del total, seguida de Francia, Reino Unido y Alemania, que son los socios principales de la compañía Airbus; posteriormente Canadá que se ubica en la 5ª posición con ingresos de 22 mil millones de dólares. Brasil se encuentra en el 10º lugar. Todos ellos son los países de origen de las principales empresas fabricantes de aviones y motores en el mundo. México se encuentra ubicado en el 15º lugar mundial.¹

Existe una fuerte competencia entre los dos principales fabricantes de aviones con capacidad para más de 100 pasajeros: Boeing y Airbus, corporaciones que buscan satisfacer los requerimientos actuales de sus clientes, ofreciendo aviones con mayor capacidad, menores costos de operación y atractivas innovaciones que cumplan con normas ambientales más estrictas. Por otra parte, se encuentra el segmento de aviones de menor capacidad (menos de 100 pasajeros) y alcance, con los cuales se atienden las necesidades de compañías de aviación que ofrecen servicios regionales. Entre los principales fabricantes de este tipo de unidades se encuentran la canadiense Bombardier y Embraer de Brasil. Además, también existen otras compañías que fabrican aviones de tipo ejecutivo o firmas fabricantes de helicópteros.

La complejidad en la producción de una aeronave y las expectativas de buen desempeño de las partes empleadas en su fabricación, son tan altas que el aseguramiento de la calidad en este sector industrial se vuelve un elemento clave.²

El estándar aceptado mundialmente por la industria aeronáutica es la Serie 9100, y su implementación es de gran importancia para las empresas que deseen convertirse en proveedores de partes y componentes para aeronaves. La Serie 9100 es un modelo para sistemas de administración de la calidad en el sector aeronáutico basado en la norma estándar ISO 9001:2000, cuya aplicación general está a cargo de la International Aerospace Quality Group (IAQG), y cuya entidad responsable es la Society of Automotive Engineers (SAE).

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), a través de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), es la dependencia mexicana encargada de otorgar permisos para el establecimiento de fábricas de aeronaves, motores, partes y componentes, así como para llevar su control y vigilancia. Asimismo, tiene la facultad de certificar, convalidar y autorizar, dentro del marco de sus atribuciones, los programas de mantenimiento y los proyectos de construcción o modificación de las aeronaves y sus partes y productos utilizados en la aviación, así como opinar sobre la importación de los mismos.

La presencia de empresas de la industria aeronáutica en México, se ha incrementado actualmente en el país, más del doble de lo registrado en 2006, incluyendo empresas líderes en la fabricación de aviones y de partes en el mundo que realizan operaciones de manufactura y/o ingeniería como: Bombardier, Honeywell, Grupo Safran, Eaton Aerospace, Goodrich, ITR, entre otras.³

El crecimiento de la industria aeroespacial en México en los últimos años, y particularmente en Nuevo León, llevó a que el Gobierno del Estado creara en el año 2005, un consejo ciudadano de la industria aeroespacial. Este es uno de los cinco consejos que fueron creados siguiendo los lineamientos del Programa Regional de Competitividad e Innovación para la promoción de sectores estratégicos de la economía estatal.

La Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León, es uno de los participantes de este consejo, el cual identificó la necesidad de hacer un estudio de factibilidad y pertinencia para la creación de un programa educativo a nivel maestría, que pudiese contribuir al desarrollo de la industria aeroespacial en la región.

En el año 2007 se crea a raíz del Consejo, el Clúster Aeroespacial de Nuevo León, actual Aeroclúster, en el cual la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León dirige el Comité de Innovación.

La Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la FIME, en Marzo del 2012 abre las puertas del Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA), con el objeto de ser el brazo tecnológico de las industrias aeronáuticas y aeroespaciales del norte de México, promoviendo proyectos de alto valor en la cadena productiva, desarrollando alta ingeniería, investigación, e innovación tecnológica en las diversas ramas del sector aeroespacial, con actividades orientadas al desarrollo de nuevas tecnologías, productos, materiales y procesos.⁴

Considerando que la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, es y ha sido uno de los actores más importantes en la formación de ingenieros en la región, se impone el reto de llevar a cabo un análisis de factibilidad y pertinencia del Programa Educativo (PE) de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Aeroespacial, cuyo programa ya está vigente en la actualidad.

En la industria aeronáutica existen diversos temas de interés para el desarrollo de proyectos de investigación, innovación y soporte tecnológico; pero un tema que apremia a esta industria es cuando los materiales metálicos dejan de ser funcionales y su manifiesto es la degradación electroquímica u oxidación en alta temperatura, por las condiciones de operación de la aeronaves.

El Control de la corrosión en la industria aeronáutica es un tema que siempre ha sido importante, pero es cada vez más en función del envejecimiento de la flota de aeronaves. La corrosión puede conducir a la no disponibilidad de las aeronaves y en casos extremos, a una falla catastrófica. Bajo estas circunstancias es importante que el lector conozca los fundamentos de corrosión y control, evaluación y predicción para estos materiales.⁵

La mayoría de los metales usados en la industria aeronáutica están sujetos a corrosión. El ataque puede tener lugar sobre una superficie metálica entera, o puede ser penetrante en los resquicios de los ensambles, ocasionando un ataque localizado y generando picaduras profundas, o bien pueden los agentes corrosivos difundir en los límites de grano y provocar un ataque intergranular. Los esfuerzos externos o las cargas existentes en la estructura metálica en conjunto con el ambiente atmosférico, pueden provocar mecanismos de degradación que combinados ocasionan agrietamientos del material por tensión y fatiga. Existen otros materiales que pueden ayudar a que la corrosión inicie y es promovido por el contacto de los metales con materiales que absorben agua, tales como madera, esponja, goma, fieltro, la suciedad, la película de la superficie, etc.

La corrosión se manifiesta de muchas formas diferentes, las cuales pueden identificarse en este tipo de industria; estas puede ser del tipo general o localizada.

Corrosión Uniforme o General es el tipo más común que ocurre en la superficie de las aeronaves, y resulta de la reacción directa de la superficie de metal con el oxígeno en el aire. Al no ser adecuadamente protegido, el acero inoxidable, aluminio, magnesio, y titanio entre otros, se

oxidan y forman productos de corrosión. El ataque puede ser acelerado por las diferentes atmósferas en las que circulan las aeronaves.

Corrosión galvánica es cuando se tienen metales distintos o de reactividad diferente, y al estar en contacto por un electrolito (líquido o gas continuo, trayectoria de pulverización de sal, gases de escape, condensado), puede uno de ellos reaccionar y ser el que represente al ánodo (corrosión) y el cátodo el material que no se degrada. El grado de ataque depende de la actividad relativa de las dos superficies, mayor es la diferencia en la actividad, más grave es el ataque. Por ejemplo magnesio y sus aleaciones son muy activos y se corroen fácilmente. Ellos requieren una máxima protección. La protección especial requerida es asegurar que la corrosión de metales disímiles no se presente.

Corrosión intergranular es un ataque selectivo a lo largo de los límites de grano de aleaciones metálicas, y es el resultado de la falta de uniformidad en la estructura de la aleación. Es particularmente característico de aleaciones de aluminio endurecidas por precipitación y algunos aceros inoxidable. Las aleaciones de aluminio 2024 y 7075 que contienen cantidades apreciables de cobre y zinc respectivamente, son muy vulnerables a este tipo de ataque, si no se les realiza adecuadamente el tratamiento térmico pueden ser susceptibles a este tipo de corrosión.

Existen algunos materiales en los que es difícil de detectar el tipo de corrosión presente, aun cuando se les haga análisis por ensayos no destructivos, el material puede presentar exfoliación o ampollamiento.

Corrosión Asistida por esfuerzo (SCC siglas en inglés), esto resulta del efecto combinado de las tensiones de tracción estática y/o aplicada, a una superficie durante un período de tiempo bajo condiciones corrosivas. En general la susceptibilidad aumenta con el esfuerzo, particularmente a cargas que se aproximan al límite elástico, y al aumentar la temperatura, el tiempo de exposición y la concentración de componentes corrosivos en el ambiente circundante. Remaches de aleación de aluminio empleados en la misma estructura de las aeronaves, en tornillos y pasadores cónicos del tren de aterrizaje, engranes y otros componentes, son ejemplos de partes que son susceptibles a la corrosión asistida por esfuerzo.⁶

Corrosión-Fatiga. La fatiga por corrosión es un tipo de corrosión por esfuerzo resultante de esfuerzos cíclicos en un metal inmerso en un entorno corrosivo. La corrosión puede comenzar en la parte inferior de un defecto o picadura en una zona tensionada.

Rozamiento y Fatiga – Corrosión. Es una Corrosión de contacto, con un tipo limitado de ataque que se desarrolla cuando el movimiento relativo de pequeña amplitud tiene lugar entre cerrar y abrir componentes. El contacto de roce destruye la película protectora de los materiales que pueden estar presentes sobre la superficie metálica, y además, elimina las partículas pequeñas de metal virgen de la superficie. Estas partículas actúan como un abrasivo y evitan la formación de una película protectora de óxido, y expone al material a la atmósfera. Si las áreas de contacto son pequeñas y afiladas, profundos surcos semejantes a marcas o muescas de presión, pueden ser usados en la superficie de rozamiento.

El daño por corrosión para fuselajes de los aviones es un ejemplo de la corrosión atmosférica, un tema que se describe en detalle en un módulo separado. Aeropuertos ubicados en ambientes marinos merecen una atención especial en este contexto. El riesgo y el costo de los daños por corrosión son particularmente elevados tras el envejecimiento de las aeronaves. Sólo en los Estados Unidos, la corrosión de las aeronaves es un problema de miles de millones de dólares.

En algunos tipos de aeronaves militares, las horas de mantenimiento por la corrosión se sabe que superan las horas de vuelo.⁷



Figura 1. Tipos de corrosión en la industria aeronáutica

El 28 de abril de 1988, un avión Boeing 737 operado por Aloha Airlines, con 19 años de edad, perdió una parte importante del fuselaje superior, cerca de la parte delantera del avión, en pleno vuelo a 24.000 pies. El deterioro se debió a un problema de corrosión-Fatiga, iniciado por un agrietamiento en las pieles de la aeronave, este avión trabajaba en vuelos cortos y estaba siempre sometido a la presurización constante, así que los remaches de los paneles del fuselaje se fueron agrietando poco a poco hasta provocar el accidente. El incidente Aloha marcó un punto de reflexión en la historia de la corrosión de las aeronaves.⁸⁻⁹



Figura 2. Accidente del avión Boeing 737 operado por Aloha Airlines

Con base en los antecedentes de corrosión en la industria aeronáutica, el objetivo de este capítulo es presentar dos casos de investigación; donde se caracteriza al aluminio 2024-T3 en un sistema de corrosión asistida por esfuerzo, y por otro lado un método de protección para aleaciones de aluminio 2024-T3 y 6061-T6 empleando recubrimientos nanométricos de cromo/aluminio y aluminio/cromo depositados por Sputtering.

2. Metodología Experimental

2.1. Corrosión Asistida por Esfuerzo del Aluminio 2024-T351 en presencia de NaCl

Cuando existe un esfuerzo mecánico sobre un metal o aleación que se halle en un medio corrosivo, puede originarse el agrietamiento del material metálico y posteriormente su rotura. El esfuerzo mecánico puede ser debido a tensiones residuales o a tensiones externas, en cuyo caso puede tener lugar el agrietamiento por corrosión asistida por esfuerzo (CAE), o bien tratarse de esfuerzos alternados, dándose entonces el fenómeno de corrosión fatiga (CF).¹⁰

La aleación de aluminio (AA) 2024-T351 es ampliamente utilizada en la industria de la Aeronáutica debido a su relativamente baja densidad, excelentes propiedades mecánicas y buena resistencia a la corrosión. Recientes estudios muestran el comportamiento electroquímico de esta aleación de aluminio.⁵ El objetivo de este estudio fue determinar la susceptibilidad de la aleación al fenómeno de Corrosión Asistida por Esfuerzo (CAE). Este tipo de corrosión es muy peligrosa, se presenta cuando ciertos materiales son sometidos a la acción conjunta de esfuerzos de tracción y a un medio corrosivo específico, y estos sufren el fenómeno de corrosión asistida por esfuerzo presentándose la nucleación, crecimiento y propagación de fisuras a niveles muy bajos de esfuerzos mecánicos. CAE es un tipo de corrosión localizada, puesto que se puede propagar sin ningún daño visible, que pueda ser observado.¹¹

Se empleó para ello la técnica CERT (prueba a velocidades de extensión constante), ASTM G129,¹² y la técnica de Ruido Electroquímico. La aleación se expuso a un medio agresivo de NaCl utilizando dos porcentajes (3.5 y 5%) a diferentes velocidades de deformación lenta. Los especímenes ensayados fueron caracterizados por el microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido (MEB).

2.2. Recubrimientos nanométricos de cromo/aluminio y aluminio/cromo depositados por Sputtering en aleaciones de aluminio 2024-T3 y 6061-T6.

Los recubrimientos son un método de protección contra la corrosión, actúan por medio de un efecto de barrera (protección catódica), donde el material del recubrimiento actúa como un ánodo de sacrificio e inhibición/pasivación, incluyendo casos de protección anódica. Hay varios tipos de recubrimientos, entre los cuales se encuentran los metálicos, y son divididos en dos grupos: los catódicos, que se comportan más nobles que el sustrato, y los anódicos, que son más activos que el sustrato, los recubrimientos catódicos actúan como barrera, pero por algunas combinaciones del sustrato y el ambiente, el sustrato puede ser protegido anódicamente; mientras que los recubrimientos anódicos en adición a un efecto de barrera, también proveen protección catódica. La mayor diferencia entre ambos es el comportamiento hacia la presencia de defectos.¹³⁻¹⁴ Entre los principales métodos de deposición de recubrimientos se encuentra el PVD (Physical Deposition Vapour); dentro del cual está la técnica de Sputtering, donde las depositaciones resultantes son de tamaño nanométrico, sin embargo comúnmente se presentan una serie de imperfecciones ó defectos, como son microfracturas, porosidad, y grietas; que

resultan como consecuencia del pre tratamiento del sustrato, y con mayor frecuencia durante el proceso de depositación.¹⁵ Estas imperfecciones actúan como túneles para los iones corrosivos, como lo son los Cl⁻, por medio de fuerzas capilares, hasta llevarlos a la superficie del sustrato, lo que origina la formación de acoplamientos galvánicos, y por la relación de áreas, el sustrato resulta ser el más afectado, pues la pequeña área del defecto donde entran los iones corrosivos actúa como ánodo, y el recubrimiento como cátodo, llevando a un proceso de corrosión localizada en el sustrato, en el caso de que el recubrimiento sea catódico.⁴ Existen formas de disminuir la densidad de imperfecciones, como son: la realización de un recubrimiento amorfo, aumentar el grosor del recubrimiento, depositar en forma de bicapas o multicapas, con tal de incrementar el número de interfaces presentes, que actuarán como un mecanismo de barrera para dislocaciones, pues estas son las que dan lugar a las imperfecciones.¹⁶⁻¹⁸

Los sistemas experimentales consistieron en recubrimientos de Al y de Cr depositados mediante la técnica de Magnetron Sputtering, sobre aleaciones de Aluminio AA6061-T6 y AA2024-T3. Ambos sustratos en medidas de 2 x 2.5 cm. Sobre cada uno de los sustratos se depositó un arreglo de bicapas en diferente orden, una con capa inicial de Al y capa externa de Cr, la cual queda expuesta a la superficie; y la otra con una capa inicial de Cr y sobre ésta una capa externa de Al en contacto con el electrolito. También se contó con un sustrato no recubierto, al que se le llamó Blanco, el arreglo del sistema es mostrado en las Figuras 1 y 2. Ambos recubrimientos presentan un grosor de 1 micra aproximadamente. La nomenclatura utilizada fue sustrato-capa interna-capa externa; de tal manera que quedan como 6061AlCr, 6061CrAl, 2024AlCr y 2024CrAl.

La técnica de ruido electroquímico se llevo a cabo en la interface electroquímica 1285 de Solartron, en una solución de NaCl al 3.5%, usando una celda de picado con arreglo convencional de tres electrodos. Los sistemas de prueba fueron utilizados como electrodos de trabajo, con una superficie electro activa de 1cm², un electrodo de Calomel saturado (ECS) es utilizado como electrodo de referencia, y un contraelectrodo de Platino. El potencial a circuito abierto (OPC) fue medido después de 20 minutos de estabilización. Las series de tiempo se obtuvieron monitoreando 1024 datos, a 1 dato por segundo.

3. Resultados

3.1. Corrosión Asistida por Esfuerzo del Aluminio 2024-T351

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados se muestran en la Tabla 1, donde se observa que no hay mucha diferencia entre el esfuerzo máximo de los ensayos realizados en el medio inerte y los medios agresivos, comparando estos resultados con los valores teóricos del esfuerzo máximo de la aleación de aluminio de la norma ASTM B211.¹⁹

En la Figura 3 se muestra una curva esfuerzo-deformación a una velocidad de extensión de 1×10^{-6} mm/s⁻¹, donde se observa un comportamiento similar para los tres medios analizados, mostrando que el medio corrosivo no influye en el crecimiento de grietas y en la falla del material.²⁰

Con la técnica de ruido electroquímico, el monitoreo se llevo simultáneamente con el ensayo mecánico, debido a que es una técnica no destructiva.¹⁰ En las Figuras 4-6, se presentan las series de tiempo en corriente y en potencial a una velocidad de extensión de 1×10^{-6} mm/s⁻¹. En los resultados del medio inerte (Figura 4), se puede observar que el potencial no presenta

fluctuaciones severas ni potenciales negativos; por lo tanto aparece como ruido blanco.²¹⁻²² Sin embargo, en los medios corrosivos, las fluctuaciones del potencial son negativas y de baja intensidad, el cual cambia debido a la activación del medio con el espécimen (Figuras 5-6). Las velocidades de extensión de $2 \times 10^{-6} \text{mm/s}^{-1}$ y $7 \times 10^{-6} \text{mm/s}^{-1}$ muestran un comportamiento similar.

Velocidad de extensión (mm/s-1)	Velocidades de deformación (/s-1)	Medio	Esfuerzo máximo (kg/mm2)	Tiempo de falla (h)
1 x 10-06	8.1 x 10-07	Glicerol	48.616	72.06
	8.2 x 10-07	NaCl 3.5%	47.791	73.54
	8.9 x 10-07	NaCl 5%	47.797	78.03
2 x 10-06	1.7 x 10-06	Glicerol	48.603	36.00
	1.7 x 10-06	NaCl 3.5%	48.053	35.24
	1.6 x 10-06	NaCl 5%	48.517	37.30
7 x 10-06	5.9 x 10-06	Glicerol	48.659	10.00
	6.2 x 10-06	NaCl 3.5%	47.532	10.00
	6.0 x 10-06	NaCl 5%	47.644	11.03

Tabla 1. Resultados de las curvas esfuerzo-deformación

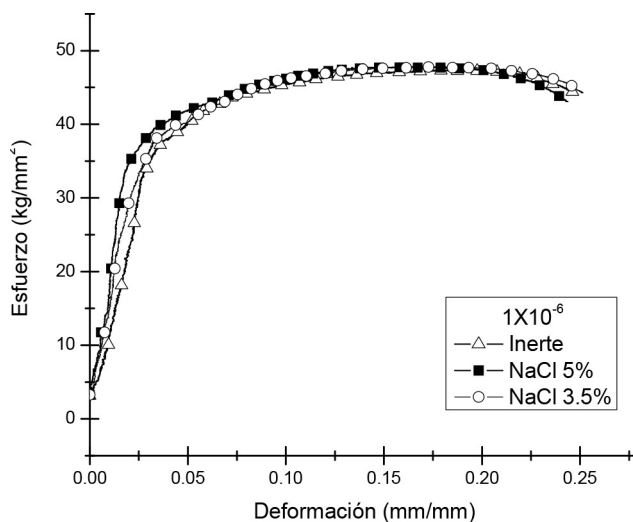


Figure 3. Curva esfuerzo-deformación del AA, a una velocidad de extensión de 10^{-6}mm/s^{-1} en los tres medios ensayados

Ensayos sin tensión: Se realizaron pruebas de los especímenes de AA, con el fin de conocer los potenciales presentes en los medios analizados. En la Figura 7 se observa el potencial, que se encuentra en un rango entre -0.682 y -0.690 V, observándose un ruido blanco debido a que la aleación se encuentra en un medio inerte, donde la corriente se encuentra en el orden de 10^{10}A/cm^2 .

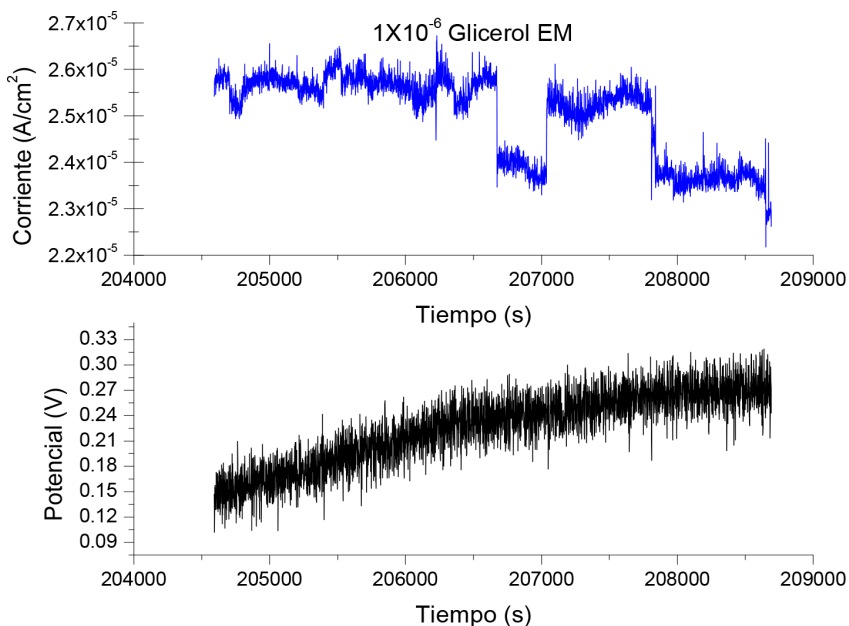


Figura 4. Series de tiempo en corriente y en potencial de la zona del esfuerzo máximo, a una velocidad de deformación de $1 \times 10^{-6} \text{ mm/s}^{-1}$; en Glicerol

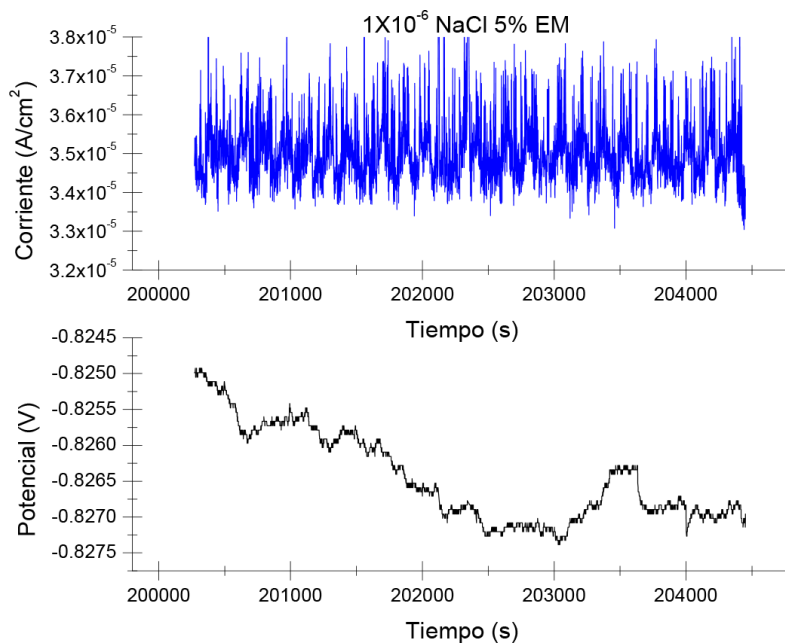


Figura 5. Series de tiempo en corriente y en potencial de la zona del esfuerzo máximo, a una velocidad de deformación de $1 \times 10^{-6} \text{ mm/s}^{-1}$; en NaCl al 3.5%

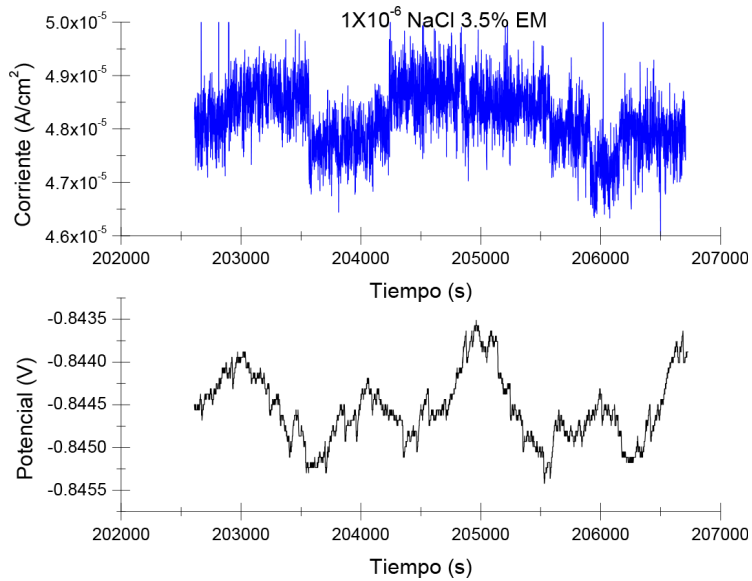


Figura 6. Series de tiempo en corriente y en potencial de la zona del esfuerzo máximo, a una velocidad de deformación de $1 \times 10^{-6} \text{ mm/s}^{-1}$; en NaCl al 5%

En los resultados de las series de tiempo en corriente y en potencial en los medios agresivos de 3.5 y 5 por ciento de cloruro de sodio, los potenciales se comportaron parecidos, fluctuando en un rango de -0.950 y -0.650 V , como se muestra en las Figuras 8-9. Se observa cómo el potencial aumenta hasta alcanzar el aproximado al del medio inerte. En la Figura 5 en un medio de 3.5% de NaCl, la corriente fluctúa en el orden de 10^{-9} A/cm^2 , y en un medio de 5% de NaCl ésta fluctúa entre 10^{-9} y 10^{-10} A/cm^2 , como se observa en la Figura 7. El tiempo de exposición de la aleación para cada uno de los medios analizados fue de 1 hora con 30 minutos.

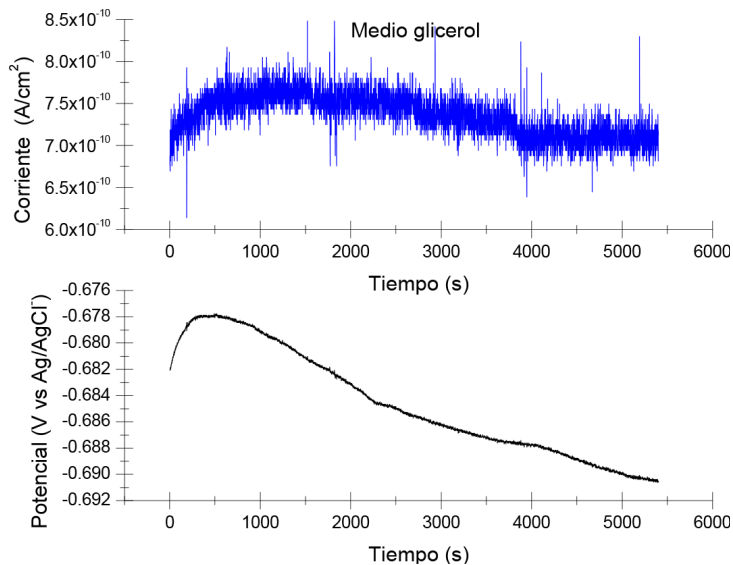


Figura 7. Series de tiempo, en corriente y en potencial en el medio inerte (glicerol), sin tensionar

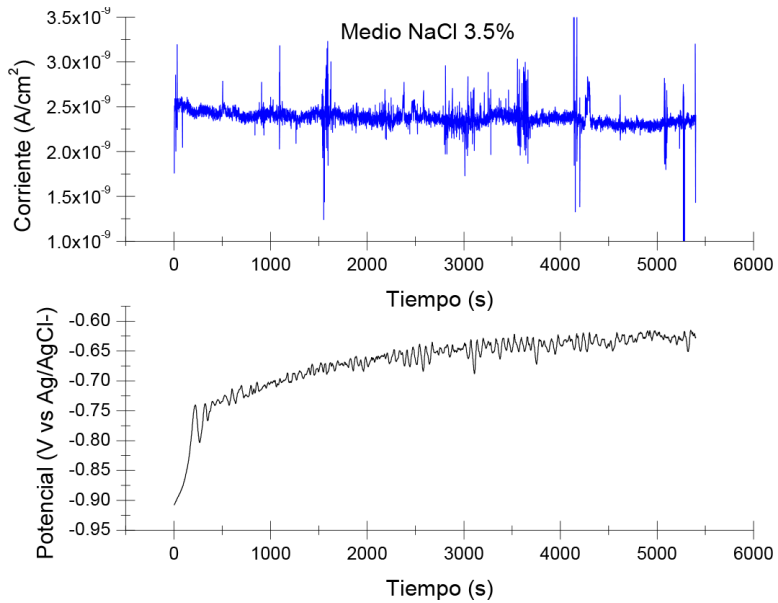


Figura 8. Series de tiempo, en corriente y en potencial en el medio agresivo (NaCl 3.5%), sin tensionar

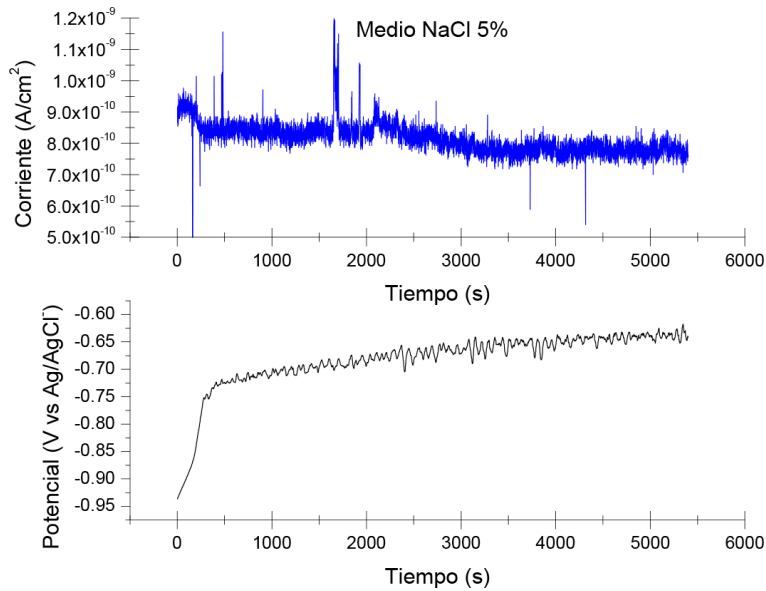


Figura 9. Series de tiempo, en corriente y en potencial en el medio agresivo (NaCl 5%), sin tensionar

En la Figura 10a se observa el espécimen que fue inmerso en el medio inerte, presentando una superficie libre de corrosión. En las Figuras 10b y 10c, se observan los especímenes inmersos en los medios corrosivos de cloruro de sodio, mostrando grietas que no se propagaron por la influencia del medio. Las imágenes del MEB permitieron observar las microcavidades por coalescencia, lo cual fue evidencia de que la fractura fue dúctil.

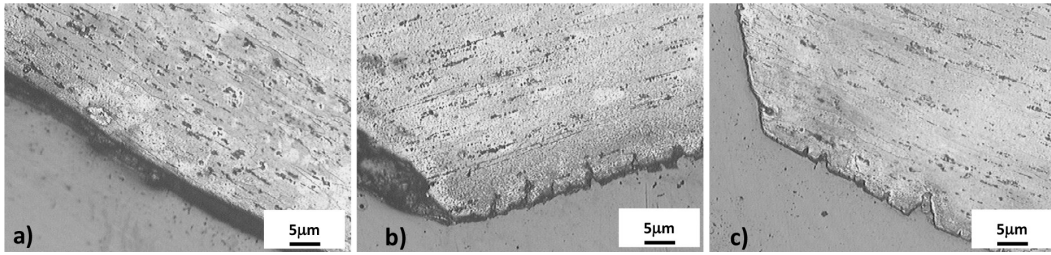


Figura 10. Sección transversal de los especímenes ensayados a tensión, observados por el microscopio óptico. Velocidad de extensión de $1 \times 10^{-6} \text{mm/s}^{-1}$: a) Medio inerte, b) NaCl 3.5%, y c) NaCl 5%

3.2. Recubrimientos nanométricos de cromo/aluminio y aluminio/cromo depositados por Sputtering en aleaciones de aluminio 2024-T3y 6061-T6.

Las series de tiempo de ruido electroquímico en corriente y potencial para los sistemas Blancos del aluminio 2024 y 6061, permiten distinguir que los transitorios de ruido en potencial presentan gran tamaño y son de larga duración, todos con dirección positiva (Figura 11). Esto es común en un tipo de corrosión localizada, y éstas características en los transitorios se deben a la existencia de una capa pasiva de Al, que se rompe y se repasiva continuamente; mientras que los eventos presentados en ruido en corriente tienen la misma dirección, debido al proceso anódico en el sustrato. Es posible observar que los transitorios de corriente duran menos que los de potencial, pues los de corriente indican que se termina la disolución del metal y el potencial se recupera hasta que se consume el exceso de carga por medio de las reacciones catódicas, de hidrógeno y de agua. La observación directa de los transitorios individuales, admite que presentan una subida rápida, seguida de una caída exponencial, lo que es característico de una picadura metaestable de una Aleación de Aluminio.²¹

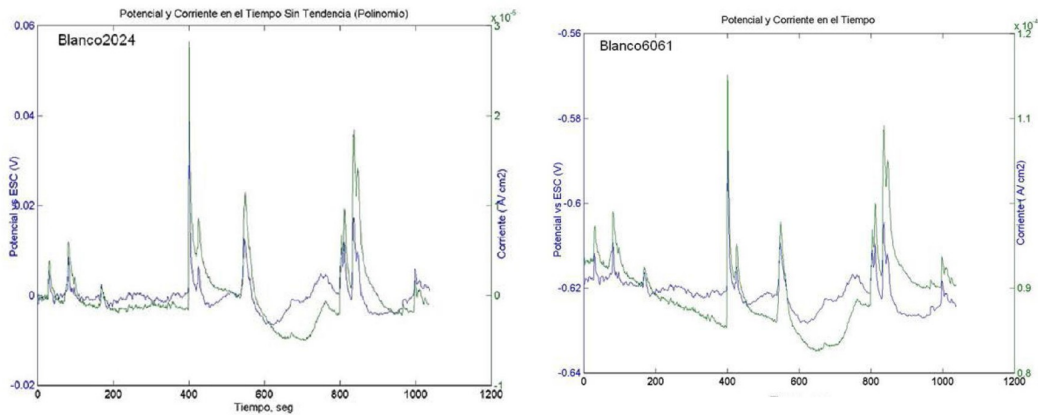


Figura 11. Series de tiempo en potencial y corriente para Blanco 2024 y Blanco 6061

En el análisis estadístico se indica que la R_n es muy elevada para ambos Blancos, 2024 y 6061 ($1.07 \times 10^3 \text{ Ohm/cm}^2$ y $1.054 \times 10^3 \text{ Ohm/cm}^2$, respectivamente), quizá por el bloqueo de las picaduras por los productos de corrosión del sustrato; así mismo, la I_{corr} es de $2.42 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ (Blanco 2024), y $3.49 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ (Blanco 6061). En efecto, éstas son menores que en los sistemas, sin embargo está asociada a corrosión por picaduras y no a corrosión uniforme.

Respecto al DEPM, es de 0.0015 V/ECS para Blanco 2024, y de 0.0023 V/ECS en el Blanco 6061, en ambos casos indica que el tipo de corrosión está controlado por procesos de rotura y repasivación; es decir de una picadura metaestable, como lo es evidenciado por el análisis directo de las series de tiempo, de acuerdo con autores que han constatado que DEPM de este orden se asocia con picaduras metaestables.²³

En los sistemas 2024AlCr, 2024CrAl, 6061AlCr y 6061CrAl, se observan pocos eventos individuales, pequeños y con tiempos de relajación cortos.²³ El ruido en potencial es muy estable para ambos, con una rango de 5 a -5 mV/ECS para 2024AlCr, y de menos de 1mV/ECS para 2024CrAl, 6061AlCr y 6061CrAl; mientras que respecto al ruido en corriente se observa una superposición de eventos anódicos y catódicos con fluctuaciones muy rápidas. Este tipo de comportamiento es característico en un proceso de corrosión uniforme.²⁴ Los registros en el tiempo se muestran en la Figura 12.

En el análisis estadístico, la DEI es mayor en los sistemas 6061AlCr y 2024AlCr que en 6061CrAl y 2024CrAl, por lo que es un indicativo de que los procesos de corrosión ocurren con mayor velocidad en los sistemas con arreglo AlCr.²⁵ En lo que concierne a la DEP, es mayor en 6061AlCr que en 6061CrAl, y en 2024CrAl. En el primer caso se asocia a que la corrosión es aún más localizada en el sistema y que los procesos de pasividad son menores, y en el segundo caso a que la Resistencia al ruido en la interface es mayor, de acuerdo a algunos investigadores que explican que el comportamiento de ésta magnitud se relaciona con ambos procesos.^{6,25}

Respecto a la DEPM para todos los sistemas, es de 10^{-5} V/ECS, indicando un proceso de corrosión uniforme controlado por trasferencia de carga, como lo han constatado algunos autores, excepto en 6061CrAl, que presenta un valor de 10^{-4} V/ECS, y que es característico de una corrosión ligera o fenómenos de pasivación controlados por un proceso de difusión de iones y electrones.²⁶ Esta interpretación coincide con la realizada por la inspección de manera directa a partir de las series de tiempo.

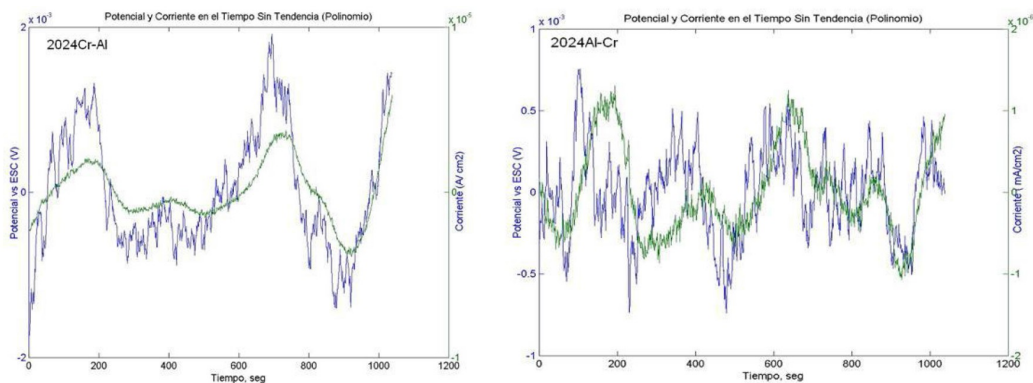


Figura 12. Series de tiempo en potencial y corriente para Aluminio 2024 con nanorecubrimientos de Al-Cr y Cr-Al

En lo referente al IL, éste indica que el tipo de corrosión para el arreglo AlCr en ambos sustratos es mixto, y para CrAl es de tipo Uniforme, lo que significa que es posible que aparezcan algunas picaduras localizadas y corrosión uniforme como forma dominante. Una vez más éste parámetro lleva a obtener la misma información obtenida por análisis directo y de la DEPM.

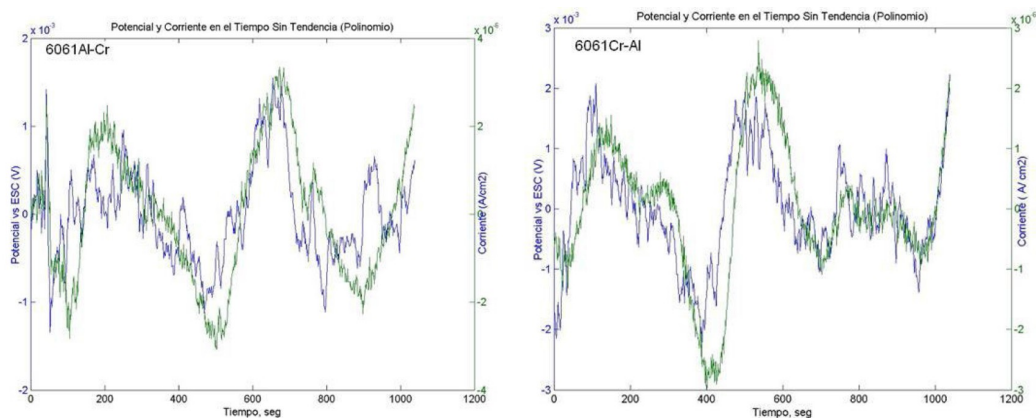


Figura 13. Series de tiempo en potencial y corriente para Aluminio 6061 con nanorecubrimientos de Al-Cr y Cr-Al

Mientras, la I_{corr} es mayor en el arreglo AlCr para ambos sustratos, por lo que indica que los procesos de transferencia de carga son facilitados para el sistema con la capa de Cr superficial, debido a los defectos existentes en ésta, y que favorecen la formación de las celdas micro galvánicas, que llevan a la disolución del Al. De acuerdo a lo discutido anteriormente, esta información es totalmente consistente con la obtenida por medio de las curvas de polarización.

Los valores obtenidos del análisis estadístico son presentados en las Tablas 2 y 3.

Sistema	Rn (ohm/cm ²)	I_{corr} (A/cm ²)	DEP (V/ECS)	DEI (V/ECS)	DEPM (V/ECS)	IL
2024AlCr	424.52	6.12×10^{-5}	1.43×10^{-4}	$8,09 \times 10^{-7}$	5.11×10^{-5}	0.0141
2024CrAl	768.04	3.38×10^{-5}	4.18×10^{-4}	5.44×10^{-7}	8.75×10^{-5}	0.0086

Tabla 2. Valores obtenidos del Análisis Estadístico en el dominio del tiempo para los sistemas 2024AlCr y 2024CrAl

Sistema	Rn (ohm/cm ²)	I_{corr} (A/cm ²)	DEP (V/ECS)	DEI (V/ECS)	DEPM (V/ECS)	IL
6061AlCr	353.74	7.34×10^{-5}	5.33×10^{-4}	1.5×10^{-6}	8.23×10^{-5}	0.0229
6061CrAl	684.78	3.79×10^{-5}	4.26×10^{-4}	6.23×10^{-7}	1.43×10^{-4}	0.0085

Tabla 3. Valores obtenidos del Análisis Estadístico en el dominio del tiempo para los sistemas 6061AlCr y 6061CrAl

4. Conclusiones

El problema de la corrosión en la industria aeroespacial, es un tema de suma importancia cuando se busca tener materiales que tengan buena resistencia a ambientes agresivos en diversas condiciones de servicio.

4.1. Corrosión Asistida por Esfuerzo del Aluminio 2024-T3

- La técnica electroquímica de ruido electroquímico a través de las series de tiempo permitió observar el comportamiento cinético del material en estudio cuando es evaluado en condiciones de esfuerzo y corrosión.
- El tipo de fractura que se presentó en todas las probetas ensayadas fue dúctil tipo copa-cono, caracterizada por la formación de coalescencia de cavidades.
- La falla presentada fue debido a la tensión mecánica a que estaban sometidos los especímenes, el medio agresivo no influyó para que ocurriera la fractura de la muestra, dado que no se observaron picaduras sobre la superficie (siendo causa de inicio de grieta).
- La aleación no presenta susceptibilidad a la Corrosión Asistida por Esfuerzo en medios agresivos de cloruro de sodio al 3.5 y 5%.

4.2. Recubrimientos nanométricos de cromo/aluminio y aluminio/cromo depositados por Sputtering en aleaciones de aluminio 2024-T3y 6061-T6

- Los recubrimientos CrAl son los más estables, independientemente del sustrato. 6061AlCr y 6061CrAl se comportan catódicamente. En estos recubrimientos se presentan problemas de adhesión y delaminación.
- Todos los sistemas disminuyeron la propagación de las picaduras, llevando a un estado de pasivación o corrosión uniforme, cada uno por diferentes mecanismos.

Agradecimientos

Se agradece a la Dra. Claudia Meléndez López, M.C. Irene López Cazares y M.C. Patricia Morquecho (†) quienes contribuyeron con algunos resultados de sus tesis de Maestría en esta investigación. A los técnicos académicos M.C. Adán Borunda Terrazas y Lic. Jair Lugo Cuevas por su ayuda en la experimentación.

Los autores agradecen el apoyo a la UANL - cuerpo académico UANL-CA-316 y al proyecto Promep /103.5/12/3585. (UANL-PTC-562 / PTC-586).

Referencias

1. <http://www.economia.gob.mx/comunidad-negocios/industria-ycomercio/informacion-sectorial/110-aeroespacial/348-mexico-crece-en-industria-aeroespacial>
2. Discussion paper. *AeroStrategy Management Consulty*. Noviembre de 2009. www.aerostrategy.com
3. Aerospace Globalization 2.0: Implications for Canada's Aerospace Industry.
4. <http://www.fime.uanl.mx/CIIIA/>
5. Benavides S. *Corrosion control in the aerospace industry US Coast Guard*. Woodhead Publishing Limited. UK. 2009.
6. Gaona C. Tesis de Doctorado. CIMAV. México. 1999.
7. Miller D. *Corrosion Control on Aging Aircraft: What is being done?*. Materials Performance. October 1990: 10-11.

8. Wildey II JF. *Aging Aircraft*, Materials Performance. March 1990: 80-85.
9. Komorowski JP. *Quantification of Corrosion in Aircraft Structures with Double Pass Retroreflection*, Canadian Aeronautics and Space Journal. June 1996; 42(2): 76-82.
10. Logan HL. *Stress corrosion cracking of metals*. New York; 1966.
11. McIntyre DR. *Environmental cracking*. Process Industries Corrosion - The theory and practice. Ed. Moniz and Pollock, NACE. Houston, Texas. 1986.
12. ASTM G 129. *Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking*. 1995.
13. Shreir LL, Jarman RA, Burnstein GT, editors. *Corrosion*. Vol. 2, 3rd Ed. Oxford: Butterworth Heinemann; 1994.
14. Cekada M, Panjan P, Kek-Merl D, Panjan M, Kapun G. *Sem Study of defects in PVD hard coatings*. 2008; Vacuum 82: 252-256.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2007.07.005>
15. Dong H, Sun Y, Bell T. *Surface and Coatings Technology*. 1997; 90: 91-101.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)03099-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(96)03099-X)
16. Thobor A, Rousselot C, Clement C, Takadoum J, Martin N, Sanjines R, Levy F. Enhancement of mechanical properties of TiN/AlN multilayers by modifying the number and the quality of interfaces. *Surf. Coat. Technol.* 2000; 124(2-3): 210-21.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00655-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00655-6)
17. Sanchette F, Huu Tran L, Billard A, Frantz C. *Surf. Coat. Technol.* 1995; 74-75: 903.
[http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)08210-3](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(94)08210-3)
18. Stransbury EE, Buchanan RA. *Fundamentals of Electrochemical*. Ed ASM international, United States Of America. 2000: 4.
19. ASTM B 211M. *Standard Specification for Aluminum and Aluminum – Alloy Bar, Rod, and Wire*. 1995.
20. López Meléndez C. Tesis de Maestría. CIMAV. México. 2006.
21. Cottis PA, Turgoose S. *Electrochemical Impedance and Noise*. Corrosion Testing Made Easy. Series NACE. Houston, TX, USA; 1999.
22. Malo JM, Uruchurtu J. *La Técnica de Ruido Electroquímico para el Estudio de la Corrosión*. Fundamentos Técnicas Electroquímicas. Edit J. Genescá, UNAM. 2002.
23. Eden DA, John DG, Dawson JL. *Patent International*. Number 87/02022 World Intellectual Property Organization. 1987.
24. Hladky K, Dawson JL. *The measurement of corrosion using electrochemical 1/f noise*. Corrosion Science. 1982; 22(3): 231-237.
[http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X\(82\)90107-X](http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X(82)90107-X)
25. Mansfeld F, Xiao H. *Electrochemical noise analysis of iron exposed to NaCl solutions of different corrosivity*. J Electrochem Soc. 1993; 140: 2205.
<http://dx.doi.org/10.1149/1.2220796>
26. López CI. Tesis de Maestría. CIMAV. México. 2009.