



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

Corrosión Localizada en Aleaciones de Aluminio 2024 y 7075.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

MEJIA MIRELES JORGE ALBERTO



MÉXICO, D.F.

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: FRANCISCO JAVIER RODRIGUEZ GOMEZ

VOCAL: Profesor: CARLOS RODRIGUEZ RIVERA

SECRETARIO: Profesor: SERGIO LOPEZ LEON

1er. SUPLENTE: Profesor: KARINA CRUZ HERNANDEZ

2° SUPLENTE: Profesor: JOSE FERNANDO FLORES ALVAREZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE CORROSIÓN, CIRCUITO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA S/N FACULTAD DE QUÍMICA EDIF. D.

ASESOR DEL TEMA:

FRANCISCO JAVIER RODRIGUEZ GOMEZ

SUSTENTANTE (S):

JORGE ALBERTO MEJIA MIRELES

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
1.1 CORROSIÓN	7
1.2 CORROSIÓN POR PICADURAS	9
1.2.1 MECANISMOS	11
1.3 ENSAYOS DE CORROSIÓN EN EL LABORATORIO	13
1.4 MANEJO DE LA CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA AÉREA	16
1.4.1 PRINCIPALES TIPOS DE CORROSIÓN EN UNA AERONAVE	17
1.5 SELECCIÓN DE MATERIALES	20
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS	
2.1 OBJETIVOS	21
CAPÍTULO 3. TÉCNICA EXPERIMENTAL	
3.1 ANÁLISIS QUÍMICO	22
3.2 DESIGNACIONES	23
3.2.1 DESIGNACIÓN G3	23
3.2.2 CONVENCION DE SIGNO PARA EL POTENCIAL DE ELECTRODO.....	24
3.2.3 CONVENCION DE SIGNOS PARA COEFICIENTES DE TEMPERATURA PARA EL POTENCIAL DE ELECTRODOS	25
3.2.4 CONVENCION DE SIGNOS PARA CORRIENTE Y DENSIDAD DE CORRIENTE	25
3.2.5 CONVENCION PARA MOSTRAR DATOS DE POLARIZACION	26
3.2.6 DESIGNACION G 59	29
3.3 VERIFICACION DE LA CALIBRACION	30
3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	31

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS	33
4.2 ANÁLISIS	46
4.2.1 POTENCIAL CONTRA TIEMPO	46
4.2.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN	49
4.2.3 CURVAS ANÓDICAS CÍCLICAS	52
4.2.4 CURVAS CATÓDICAS	52

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES	53
-------------------------------	-----------

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

6.1 BIBLIOGRAFÍA	54
-------------------------------	-----------

RESUMEN

Corrosión Localizada en Aleaciones de Aluminio 2024 y 7075.

El aluminio tiene buena resistencia a la corrosión en la atmósfera, incluso a temperaturas relativamente altas y en muchos medios acuosos. Es muy activo, como se deduce de su posición en la serie electroquímica de potenciales normales, pero se pasiva simplemente con la exposición al agua o al aire.

La capa pasiva originada por exposición al aire, tiene un espesor entre 20 y 100Å. En muchos medios oxidantes, si se daña la capa pasiva, vuelve a regenerarse rápidamente. El óxido de esta capa pasiva tiene un volumen molecular 1.5 veces mayor que el aluminio, con lo que trabaja a compresión. Por este motivo puede soportar cierta deformación del sustrato sin romperse. Cualquier factor que mejore la adherencia e integridad de esta capa mejora la resistencia a la corrosión.

La metodología utilizada para mejorar la resistencia a la tracción (particularmente) del aluminio e incrementarla bastante sin reducir demasiado otras propiedades deseables tales como la ductilidad y el peso, es aleándolo con uno o más metales o metaloides.

El problema de la corrosión se presenta en aleaciones de aluminio, las cuales se usan extensamente en la industria aérea, principalmente aquellas del tipo 2024 y 7075. Gran parte de una aeronave promedio está constituida por estas dos aleaciones y conforman la estructura y cubierta de las aeronaves.

En el caso de la aeronáutica, menor peso implica menos gasto de combustible y mayor autonomía, por esta razón las aleaciones de aluminio son muy utilizadas para la construcción de aeronaves.

La corrosión localizada por picaduras causa un gran daño en estas aleaciones, sobre todo en las partes más húmedas de la aeronave, por tal motivo a determinados períodos de tiempo la aeronave se somete a un mantenimiento

exhaustivo en el que se inspeccionan todas las zonas estructurales para llevar a cabo las reparaciones necesarias o en algunos casos reemplazar completamente algún componente. Lejos de las pérdidas económicas que pudiese causar tal problema, es de suma importancia mantener una aeronave en medida de lo posible en buenas condiciones y libre de corrosión, debido a que el aspecto más importante es evitar pérdidas humanas.

Uno de los principales agentes que atacan a este material es el cloruro, ya que es un ion muy pernicioso para la integridad del material.

Las pruebas electroquímicas llevadas a cabo en el laboratorio permiten analizar de qué manera y a qué valores de potencial y corriente un material es susceptible a sufrir corrosión localizada en la superficie expuesta a un electrolito y además cómo es su comportamiento a lo largo de estas pruebas mediante gráficos que presentan la variación entre los valores arrojados de potencial y corriente.

En este trabajo se llevó a cabo una serie de pruebas que ayudasen a determinar a qué valores de corriente se presenta la corrosión en probetas de dichos materiales (Al 2024 y Al 7075) bajo la acción de una solución de NaCl al 3% en peso. Cuatro pruebas se realizaron para cada aleación, las cuales son: *Resistencia a la polarización, Potencial vs tiempo, Curvas anódicas cíclicas y Curvas catódicas.*

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

1.1 CORROSIÓN

Anualmente las cifras gastadas en reemplazar estructuras corroídas ascienden a miles de millones de dólares. Ésto sin contar el costo de mantenimiento para la prevención de dicho proceso natural. Fallas prematuras en algunas estructuras puede resultar en pérdidas humanas. De igual manera, fallas en equipos operantes debido a la corrosión puede llegar a tener los mismos efectos.

Al tomar en cuenta estos factores, es de suma importancia considerar el problema de la corrosión para diseñar alguna estructura o equipo operante que prevenga fallas prematuras. Asimismo es necesario el monitoreo para garantizar la integridad de tales estructuras.

La corrosión es el deterioro de metales en un ambiente agresivo. La corrosión es un proceso de oxidación químico o electroquímico en el cual existe una transferencia de electrones. El ambiente en que se lleva a cabo dicho proceso puede ser líquido, gas o, híbrido sólido-líquido. Estos ambientes son llamados electrolitos, ya que ellos mismos conducen a los electrones para su transferencia.

Un electrolito es análogo a una solución conductora, la cual contiene iones cargados positiva o negativamente, a los cuales se les llama aniones y cationes, respectivamente. Un ión es un átomo que ha ganado o perdido uno o más electrones y posee una carga eléctrica. De esta manera, la corrosión puede ser un proceso químico por naturaleza o un proceso electroquímico debido a un flujo de corriente. Ésto da lugar a al menos dos reacciones que se clasifican en anódicas y catódicas.

Una reacción anódica es equivalente a lo que conocemos como oxidación, es decir, ocurre una pérdida de electrones. Contrario a la reacción anódica, la reacción catódica acepta o “gana” electrones y se le conoce también como reducción. Ambas existen en el proceso de corrosión.

Una celda electroquímica muestra claramente el proceso de corrosión, ya que dentro de ella se llevan a cabo tanto la oxidación como la reducción o, dicho de otra manera, las reacciones anódica y catódica.

La corrosión ocurre cuando la superficie del metal o aleación es atacada completa o parcialmente en un ambiente tal como un electrolito líquido, gaseoso, agua, organismos biológicos, etc. Algunos tipos de corrosión son:

- Corrosión atmosférica.- se presenta un ataque general y uniforme en toda la superficie expuesta, hasta llegar a su forma oxidada. Sin embargo, en presencia de cloruros puede ser un ataque localizado.
- Corrosión galvánica.- puede ser química o electroquímica. Se debe a la diferencia de potencial entre dos metales conectados a través de un circuito para el flujo de corriente desde el metal más activo al más noble.
- Corrosión a altas temperaturas.- ocurre en aceros, en donde se forman poros de fases oxidadas. Otras aleaciones, incluso no ferrosas pueden sufrir este tipo de ataque en otras circunstancias, por ejemplo, en presencia de sales fundidas.
- Corrosión líquido-metal.- ocurre en metales expuestos a soluciones salinas, como cloruro de sodio.

La corrosión localizada implica que las partes de una superficie expuesta, se corroen en un sitio específico. La corrosión localizada puede clasificarse de la siguiente manera:

- Corrosión en resquicios.- está asociada a los electrolitos estancados, dentro de espacios tales como polvo, productos de corrosión, arena, etc. Ocurre en superficies de hoyos del metal, bajo una junta, en uniones, bajo tornillos o bajo cabezas de remaches.
- Corrosión filiforme.- es básicamente un tipo de corrosión en resquicios, la cual ocurre por debajo de una película protectora.
- Corrosión por picaduras.- es un mecanismo localizado de corrosión que provoca picaduras destructivas.

- Corrosión biológica.- se debe a organismos no uniformemente adheridos a metales en ambientes marinos.

Efectos microestructurales. Una aleación o un metal pueden experimentar corrosión galvánica debido a diferencias en los planos atómicos y a una alta densidad de dislocaciones y cuando se forma una micropila (ánodos y cátodos).

Un tratamiento térmico mal aplicado puede dar lugar a una microestructura no uniforme y por lo tanto se alcanza una fase galvánica que induce la corrosión. En un metal cristalino, puede ocurrir un par galvánico entre granos y límites de grano. Los límites de grano son altamente energéticos.

1.2 CORROSIÓN POR PICADURAS.

La corrosión por picadura es específicamente localizada y se manifiesta en forma de hoyos en la superficie del metal. Es difícil localizar el inicio de la formación de picaduras debido a su tamaño tan pequeño y a que requiere un largo tiempo de inspección visual para detectarla. Esta picadura puede ocurrir por el rompimiento parcial de la capa pasiva. Esta forma de corrosión se encuentra comúnmente en aluminios y sus aleaciones. Tales picaduras varían en forma, pero son muy pequeñas y se localizan en lugares muy específicos.

Las picaduras se presentan en aquellas aleaciones o capas protectoras o pasivantes (Al, Acero inox). Éstas aparecen en sitios localizados debido a defectos superficiales, ya sea en un mal recubrimiento, discontinuidades mecánicas o fases microestructurales secundarias (heterogéneas). Además del tiempo prolongado para la formación y el crecimiento de una picadura, se asume que muchas reacciones anódicas y catódicas toman lugar en sitios localizados. Ambas reacciones ocurren lentamente, sin embargo las reacciones ocurren en dirección de la gravedad en la mayoría de los casos. Ésto sugiere que el fondo de las picaduras es rico en iones M^{+z} debido a la gran cantidad de reacciones anódicas.

La corrosión por picaduras representa una importante limitación a la seguridad del uso de muchas aleaciones en distintas industrias. Las picaduras es una forma

sería de daño corrosivo, debido a la rapidez con la cual las secciones metálicas pueden ser perforadas. La aparición imprevista de las picaduras y su impredecible tasa de propagación hacen difícil considerar un diseño ingenieril práctico.

El deterioro por picaduras es uno de los más comunes y peligrosos tipos de corrosión localizada que pueda encontrarse en ambientes acuosos. En las industrias de procesamiento químico, esta corrosión localizada es una causa mayor de repetidas fallas de servicio y se estima al menos un 90% del metal dañado por la corrosión en ambientes salinos.

Las picaduras forman espacios relativamente pequeños comparados con la superficie expuesta (*fig. 1*). Si el ataque apreciado está confinado a un área pequeña actuando como ánodo, las picaduras resultantes son consideradas como profundas. En cambio, si esta área es relativamente mayor y no profunda, las picaduras se consideran como superficiales. La profundidad de la picadura se determina a veces con el factor de picadura. Ésto es la proporción de la penetración más profunda en el metal con la media de penetración determinada por la pérdida de peso de la muestra. Este factor de unidad representa corrosión general o uniforme.

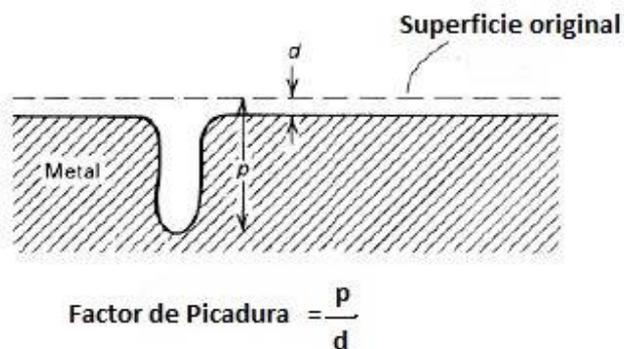


Fig. 1 Ilustración esquemática del factor de picadura p/d [REF: ASM Handbook "Corrosion" volumen 13 fig. 18 pág. 243]

1.2.1 Mecanismos

Se dice que las picaduras se originan por el rompimiento de la capa pasiva sobre la superficie del metal. El rompimiento es seguido por la formación de una celda electrolítica. El ánodo de esta celda es un área diminuta del metal activo y el cátodo es un área considerable del área pasiva del metal. La diferencia de potencial característica de esta celda activa-pasiva ayuda al flujo considerable de corriente que provoca la rápida corrosión en el ánodo. El metal pasivo resistente a la corrosión que rodea al ánodo y la propiedad activa de los productos de corrosión dentro de la picadura cuenta para la tendencia a la penetración del metal más que para la expansión a lo largo de la superficie.

Una vez que las picaduras aparecen, pueden seguir creciendo mediante un proceso autocatalítico, es decir, el proceso de corrosión dentro de la picadura produce condiciones que son necesarias para la que la actividad de la picadura continúe. El crecimiento de las picaduras es controlado por la tasa de depolarización en las áreas del cátodo. En aguas marinas el control es ejercido por la cantidad y disponibilidad del oxígeno disuelto. El cloruro férrico, un depolarizador más efectivo que el oxígeno disuelto, causa una mayor cantidad de picaduras y una penetración más rápida.

La propagación de las picaduras involucra la disolución del metal y el mantenimiento de una gran acidez al fondo de la picadura por la hidrólisis de los iones metálicos disueltos (*fig. 2*). La reacción de disolución anódica del metal al fondo de la picadura ($M = M^{n+} + ne$) es balanceada por la reacción catódica en la superficie adyacente ($O_2 + 2H_2O + 4e = 4OH^-$). El aumento de la concentración de M^{n+} dentro de la picadura resulta en la migración de iones (Cl^-) para mantener la neutralidad. El cloruro metálico formado, M^+Cl^- , es hidrolizado por agua hacia el hidróxido y el ácido libre ($M^+Cl^- + H_2O = MOH + H^+Cl^-$) (*fig. 3*). La generación de este ácido disminuye los valores de pH al fondo de la picadura. (pH aproximado de 1.5 a 1.0), mientras el pH de la demás solución permanece neutro.

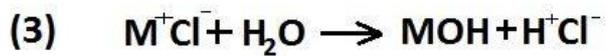
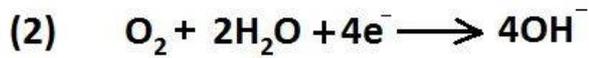


Fig. 2 . Reacciones involucradas en las picaduras: (1) disolución del metal; (2) reacción catódica y; (3) cloruro metálico hidrolizado por agua. [REF: ASM Handbook "Corrosion" volumen 13]

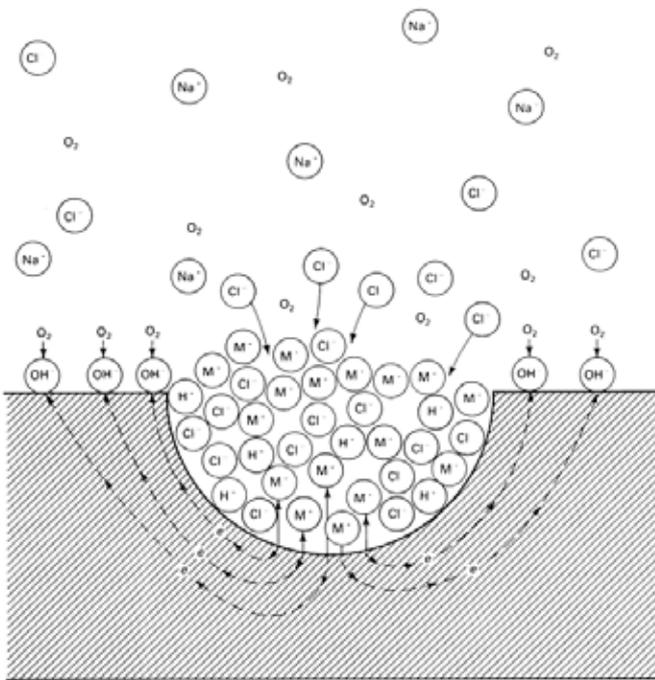


Fig. 3: Procesos autocatalíticos que ocurren en la corrosión por picadura. El metal M está siendo penetrado por una solución aireada de NaCl. Una rápida disolución ocurre dentro de la picadura, mientras la reducción de oxígeno toma lugar en superficies adyacentes. [REF: ASM Handbook "Corrosion" volumen 13 fig. 19 pág. 244]

1.3 ENSAYOS DE CORROSIÓN EN EL LABORATORIO.

Los ensayos en el laboratorio se utilizan para predecir el comportamiento de la corrosión cuando el historial de servicio es deficiente y el tiempo o presupuesto no permiten el servicio simulado en campo. De igual manera pueden ser utilizados como panorama previo al servicio en campo. Son de particular utilidad para control de calidad, selección de materiales, comparación de ambientes y el estudio de los mecanismos de la corrosión. Estas pruebas abarcan un rango de espectro desde simples ensayos de inmersión hasta varios tipos de pruebas electroquímicas sofisticadas. La mayoría de estos ensayos son acelerados mediante el diseño y deben ser hechas con precaución. Debido a que casi todo en estas pruebas se basa en conjeturas, las condiciones son arbitrarias y se debe tomar en cuenta el problema de seleccionar el método más pertinente, además siempre está presente una interpretación realista.

Al ser un proceso electroquímico, se requiere de ánodos y cátodos en contacto eléctrico mediante un electrolito. Además hay un flujo de electrones y la tasa de avance corresponde a la tasa de oxidación y reducción que ocurre en la superficie. Mediante el monitoreo de este flujo se puede evaluar la cinética del proceso de corrosión.

La mayoría de las formas típicas de corrosión, incluyendo uniforme, localizada, galvánica, bajo esfuerzos y fallas por hidrógeno inducido, pueden ser investigadas mediante técnicas electroquímicas. De la misma manera, temas como pasivación, anodizado, protección anódica y catódica, etc. pueden ser también investigados mediante estas técnicas electroquímicas, sea de corriente alterna o continua.

Aunque en el pasado estas pruebas han sido limitadas a temperatura cercana a la ambiente, ahora están siendo aplicadas a altas temperaturas y presiones y también al estudio en ambientes acuosos y no acuosos de baja conductividad.

En un sistema de corrosión, en ausencia de un potencial aplicado, la oxidación y reducción de un metal ocurren simultáneamente en la interfase metal/electrolito.

Bajo estas condiciones la corriente neta es cero, sin embargo, un valor de corrosión está ocurriendo en sitios locales anódicos sobre la superficie del metal.

Debido a que la corriente de oxidación presente en el potencial es el valor de interés en un sistema de corrosión, este parámetro debe ser determinado independientemente de la reacción de otros reactantes que se absorben o disuelven. Para determinar la tasa de corrosión, se puede utilizar métodos electroquímicos de polarización como R_p , Tafel y Curvas anódicas y catódicas.

La polarización electroquímica de una muestra metálica se lleva a cabo con un potencióstato. Un electrodo auxiliar provee la corriente a un electrodo de trabajo para polarizarlo. El potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia es monitoreado o fijado a un cierto valor en el potencióstato.

La corrosión por picadura y en resquicios está asociada normalmente con el colapso de la pasivación. La siguiente figura muestra el comportamiento de la polarización anódica y catódica de un material mostrando pasivación anódica (*fig. 4*).

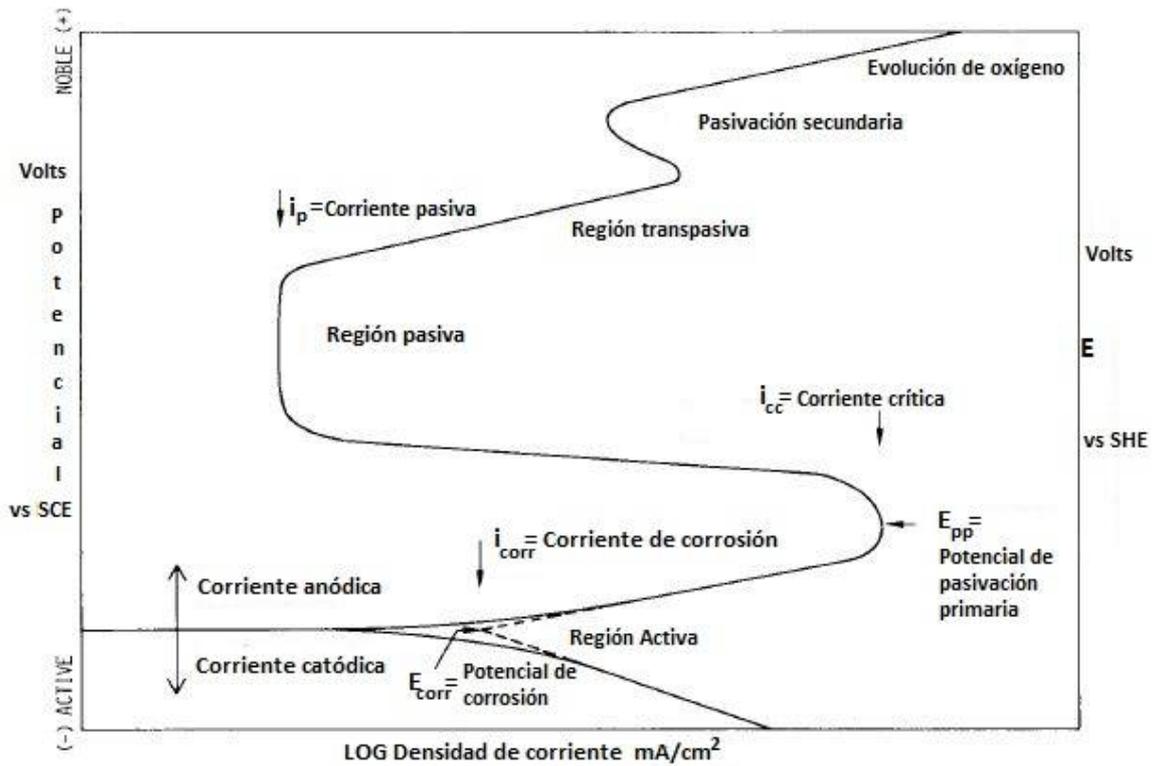


Fig. 4 Gráfico hipotético de polarización anódica y catódica para un ánodo pasivo. Las características de este diagrama ayudarán a determinar la resistencia de una aleación a un ataque localizado. [REF: ASTM Designation G 3-89 fig. 4 pág. 4]

1.4 MANEJO DE LA CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA AÉREA.

Los materiales principalmente usados en la construcción de modernas aeronaves son aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio, aceros de gran resistencia, aceros resistentes a la corrosión, aleaciones de magnesio y materiales compuestos.

El peso de la aeronave ha sido siempre la principal consideración en la construcción de éstas. La estructura debe ser ligera, pero lo suficientemente fuerte y rígida para resistir las cargas y esfuerzos aplicados. La resistencia específica al pandeo es muy importante para la selección de materiales estructurales. Por estas razones, la industria aérea ha utilizado tradicionalmente aleaciones de aluminio para la construcción de aeronaves. Asimismo, con el desarrollo de materiales compuestos, el volumen de aluminio empleado en aeronaves modernas se ha reducido significativamente, lo cual tiene un impacto en la protección contra la corrosión.

La corrosión puede tener un gran impacto en la integridad estructural. Es muy necesario conocer el ambiente de operación de las aeronaves para implementar un programa de protección a la corrosión que cumpla exitosamente con el objetivo.

Las aeronaves son frecuentemente operadas en ambientes altamente corrosivos, por ejemplo, en las costas. Las aleaciones de aluminio, los aceros de alta resistencia y las aleaciones de magnesio son muy susceptibles a varias formas de corrosión en presencia de iones cloruro si no están adecuadamente protegidas.

El manual de AGARD (Grupo consultor de desarrollo e investigación aérea, por sus siglas en inglés) ha recopilado valores relativos de corrosión para distintos tipos de atmósfera. En el manual se encuentran ambientes tropicales, industriales y marinos como muy corrosivos, mientras zonas rurales y árticas son consideradas poco corrosivas.

Además de los contaminantes en el ambiente, hay un gran número de compuestos y líquidos utilizados en la propia aeronave, tales como fluidos hidráulicos, combustible y lubricantes, los cuales pueden degradar los tratamientos protectores y pueden resultar en el ataque corrosivo. De igual manera, las zonas húmedas bajo los baños, las galeras, las baterías o zonas de roturas son identificadas para la iniciación de la corrosión. Estas áreas necesitan particular consideración en términos de diseño y protección para minimizar el riesgo de la corrosión.

Durante el mantenimiento se utilizan varias sustancias químicas para lavar, limpiar o remover pintura exterior e interior en la superficie de la aeronave. Estos materiales, si no se usan o aplican correctamente y a concentraciones adecuadas, pueden conducir a la corrosión, particularmente si se permite que lleguen a la estructura interna de la aeronave.

Estudios han mostrado que significantes niveles de iones de cloro y otras sustancias corrosivas pueden acumularse en la estructura interna de las aeronaves. Estos niveles son suficientes para iniciar la corrosión por picaduras y otras formas de corrosión localizada en aleaciones de aluminio.

A alturas de 30,000 pies o más, los tratamientos protectores en la superficie de la aeronave pueden degradarse. La temperatura puede caer hasta -60°C reduciendo la flexibilidad de la pintura. Ésto puede conducir a un agrietamiento alrededor de un afianzador, permitiendo la entrada a la humedad.

1.4.1 Principales tipos de corrosión en una aeronave.

Los materiales empleados en el fuselaje exhiben varios tipos de corrosión, tales como:

- Corrosión en ausencia de esfuerzos aplicados.
- Corrosión en presencia de esfuerzos aplicados.
- Corrosión debido al mal diseño y protección.

Corrosión en ausencia de esfuerzos aplicados. En ausencia de esfuerzos aplicados, es común la corrosión localizada. Ésta puede presentarse en forma de picaduras, intergranular o exfoliación. En el caso de las aleaciones de aluminio, la superficie está protegida por una película delgada de óxido. Una hipótesis es que preexisten defectos en la película y provee sitios para la iniciación del ataque de corrosión. Los defectos pueden estar asociados a precipitaciones, impurezas o límites de grano en la matriz. La disolución del aluminio es localizada y conduce a la formación de picaduras particularmente si hay iones de cloruro presentes.

Las picaduras son muchas veces las precursoras de fomentar un ataque localizado. En corrosión intergranular, las áreas del límite de grano se comportan anódicamente con respecto al resto de los granos. La corrosión avanza a lo largo de los límites de grano del material y puede acelerarse debido a la gran diferencia en las áreas anódica y catódica. Si los granos son alargados en forma, como en el caso de láminas y materiales extruídos, la corrosión avanza paralelamente a la superficie causando ampollamiento y descamación. Este tipo de ataque es conocido como corrosión por exfoliación y se han encontrado muchos casos de este tipo de servicio. Muchas veces, la primera indicación de que aparece este problema se da cuando la pintura adyacente a un hoyo de afianzador, se despega. En este punto, puede ocurrir que el ataque se haya difundido y una reparación sería requerida.

La corrosión microbiana se inicia por la presencia de organismos tales como hongos y bacterias. Este tipo de corrosión ha sido encontrado en tanques de combustible. Los productos que producen tales bacterias u hongos provocan acidificación, lo cual afecta al tratamiento protector aplicado en el interior del tanque.

Corrosión en presencia de esfuerzos aplicados. La corrosión bajo tensión y la corrosión por fatiga resultan de la acción sinérgica de un esfuerzo aplicado y un ambiente corrosivo. En el caso de corrosión bajo tensión, el esfuerzo de tensión es estático, mientras que en corrosión por fatiga, ese esfuerzo fluctúa de alguna manera. Han ocurrido fallas por corrosión bajo tensión principalmente en

aleaciones de aluminio de alta resistencia, tal como la aleación Al7075. Una vez iniciada, la corrosión bajo tensión puede propagarse rápidamente y eventualmente provocar una falla catastrófica.

Corrosión debido al mal diseño y mala protección. La corrosión en resquicios se presenta comúnmente como consecuencia de un mal diseño. Estos resquicios proveen un área en la estructura donde el agua, fluidos hidráulicos y otros contaminantes pueden quedar atrapados. La difusión de oxígeno dentro del resquicio es restringida, así que la segunda reacción catódica que involucra la reducción de agua a iones de hidrógeno es favorecida. Ésto incrementa la acidez de la solución en la parte alta del resquicio y provocará acelerar la corrosión de materiales estructurales tales como aleaciones de aluminio, aleaciones de magnesio y aceros de alta resistencia. El uso correcto de sellantes y compuestos de unión para rellenar los resquicios y prevenir la entrada de fluidos puede eliminar este tipo de corrosión.

Corrosión galvánica. Puede ocurrir cuando dos metales distintos son unidos. La indicación del probable riesgo de la unión de los dos metales se obtiene comparando el potencial de corrosión de ambos metales. De haber una gran diferencia entre ambos metales, por ejemplo aluminio 2024 y acero, la corrosión del material más negativo, en este caso la aleación de aluminio, se acelerará, mientras que la corrosión del acero se reducirá. Ésto se vería limitado si una capa de cadmio se aplica a las partes de acero. El potencial del cadmio es similar al Al 2024 y de esta manera, la corrosión se vería reducida considerablemente.

Corrosión filiforme. Es una forma de ataque que se desarrolla bajo capas orgánicas de protección, principalmente en aleaciones de aluminio. Aparece como largos filamentos que se alargan del área de la superficie dañada. El desarrollo de este tipo de corrosión depende de la limpieza superficial y tratamientos aplicados al sustrato.

1.5 SELECCIÓN DE MATERIALES.

En muchos casos, los materiales estructurales son inicialmente seleccionados para proveer niveles específicos de resistencia a la fatiga, fractura, etc. La corrosión es muchas veces una consideración secundaria. La filosofía adoptada fue básicamente asumir que la inherente pobre resistencia a la corrosión podría ser compensada por la aplicación de una capa protectora. Ésto asume que la capa protectora permanecería intacta y sin daños a lo largo de la vida del componente. La realidad es que, tanto películas como metales depositados sufren fallas y degradación durante la vida operacional.

La composición de la aleación, el tratamiento térmico y la forma del producto controlarán el tipo y distribución de precipitados, así como el tamaño y forma de granos. La microestructura del material junto con la naturaleza del ambiente y la capa aplicada determinarán el tipo y extensión del ataque de corrosión que toma lugar.

Durante el proceso de selección de aleaciones de aluminio debe ser tomado en cuenta la resistencia a la corrosión por exfoliación y bajo tensión.

Muchas pruebas de laboratorio, combinado con la experiencia en servicio, ha ayudado a calificar el grado de corrosión al que las aleaciones de aluminio son capaces de resistir, quedando de la siguiente manera (presente en zonas húmedas de la aeronave):

- A Inmune a la corrosión por exfoliación.
- B Resistente a la corrosión por exfoliación bajo circunstancias normales, pero podría ocurrir bajo condiciones extremas.
- C Susceptible a la corrosión por exfoliación si no se llevan a cabo las precauciones correspondientes.
- D Muy susceptible a la corrosión por exfoliación.*

**Fuente: Defence Standard 00-970 part 7/2 section.*

2. OBJETIVOS

2.1 Caracterizar las aleaciones de aluminio 2024 y 7075 desde el punto de vista electroquímico para que los siguientes parámetros puedan ser empleados en el diseño, selección de materiales y durabilidad en aplicaciones específicas:

- Evaluación y análisis del potencial de corrosión en función del tiempo.
- Evaluación y análisis de la velocidad de corrosión en función del tiempo a través de la técnica de Resistencia a la polarización.
- Evaluación del comportamiento anódico de las aleaciones mencionadas a través de curvas cíclicas para conocer potenciales de picado y de repasivación (si así se presentaran).
- Evaluación del comportamiento catódico de las aleaciones mencionadas, intentando entender el mecanismo de corrosión a través del comportamiento catódico de los posibles intermetálicos.

3. TÉCNICA EXPERIMENTAL

3.1 ANÁLISIS QUÍMICO

Se realizó un análisis por chispa a las probetas de cada uno de los materiales (Al 2024 y Al 7075) y posteriormente se comparó con la composición nominal para cada una de las probetas arrojando los siguientes resultados:

Composición química en %

Aleación Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
2024 (nominal)	0.50 máx.	0.50 máx.	3.8- 4.9	0.30- 0.9	1.2- 1.8	0.10 máx.	0.25 máx.	0.15 máx.	0.15 máx.	90.7- 94.7
Probeta 2024	0.0734	0.0825	4.491	0.4362	1.471	0.0091	0.1137	0.0154	0.0180	93.3
7075 (nominal)	0.40 máx.	0.50 máx.	1.2- 2.0	0.30 máx.	2.1- 2.9	0.18- 0.28	5.1- 6.1	0.20 máx.	0.15 máx.	87.1- 91.4
Probeta 7075	0.2233	0.1401	0.841	0.0162	1.166	0.0879	3.217	0.0286	0.0128	94.3

Tabla 1. Comparación de la composición química en % entre las nominales y las probetas utilizadas en la experimentación. Los valores nominales son según la Asociación del Aluminio (www.aluminum.org).

Para el caso de la probeta de Al 2024, la composición se acerca a la nominal en la mayoría de los casos, excepto para el caso de Si y Fe, cuyos valores están muy por debajo de los nominales.

Para el caso del Al 7075, la composición se encuentra en todos los casos por debajo de la nominal, incluso en donde se requiere un valor dentro de un intervalo. De hecho, llama la atención que el contenido de Zinc, que es

característico de esta aleación, se encuentra por debajo de lo solicitado por la especificación, sin embargo, un contenido de Zn de 3% no es clasificable dentro de las especificaciones, por lo que se optó por mantener la nomenclatura para este trabajo de tesis. El material proporcionado para estas pruebas se utiliza en la industria aérea y se obtuvo tal y como es empleado cotidianamente, de hecho, son muestras provistas por el fabricante.

3.2 DESIGNACIONES

Para la elaboración de las pruebas en el laboratorio se recurrió a las designaciones G3 y G59 de la ASTM (The American Society for Testing and Materials), utilizando dos potencióstatos: GILL y VIMAR. El primero fue utilizado para las pruebas de Potencial contra tiempo, así como para las curvas anódicas cíclicas y curvas catódicas. El segundo fue utilizado en pruebas de Resistencia a la polarización contra tiempo.

3.2.1 G3 Prácticas estándar convencionales aplicables a mediciones electroquímicas en pruebas de corrosión.

Esta práctica está destinada a proveer convenciones para presentar y mostrar registros electroquímicos de corrosión: convenciones de potencial, densidad de corriente, impedancia electroquímica y entrada, así como convenciones para presentación gráfica de los registros incluidos.

Esta práctica es una guía para reportar, mostrar y trazar registros electroquímicos e incluye recomendaciones en los signos y convenciones. El uso de esta práctica resultará en el reporte de datos electroquímicos en un formato estándar facilitando la comparación entre los datos desarrollados por distintos laboratorios a distintos tiempos. Las recomendaciones indicadas en esta prueba pueden ser utilizadas cuando se registren y se reporten datos de corrosión obtenidos de pruebas electroquímicas tales como polarización potenciodinámica y potencioestática, resistencia a la polarización, impedancia electroquímica y

mediciones de entrada, corrosión galvánica y medidas de potencial en circuito abierto.

3.2.2 Convención de signo para el potencial de electrodo

Se recomienda usar la convención de signos invariantes de Estocolmo para el reporte de resultados de la medida de potencial de la muestra en pruebas de corrosión. En esta convención, la dirección positiva del potencial del electrodo implica un incremento en la oxidación del electrodo en cuestión. La dirección positiva también ha sido denotada como la dirección “noble” porque los potenciales de corrosión de los metales más nobles, tal como el oro son más positivos que los metales base no pasivos. Por otro lado, la dirección negativa, llamada la dirección “activa” se asocia con la reducción y consecuentemente a los potenciales de corrosión de metales activos, tales como el magnesio. Esta convención fue adoptada unánimemente por la “Unión Internacional de química pura y aplicada” como el estándar para el potencial del electrodo, en 1953.

En el contexto de una muestra de electrodo de potencial desconocido en un electrolito acuoso, se considera el circuito mostrado en la siguiente figura (*fig. 5*) con un electrodo de referencia conectado a la terminal de la tierra de un electrómetro. Si el electrómetro marca en la escala cuando el switch de polaridad es negativo, el potencial del electrodo es negativo (en relación al electrodo de referencia). Inversamente, si el electrodo marca en la escala positiva la polaridad, el potencial de la muestra es positivo. Por otro lado, si la muestra es conectada a la terminal de la tierra, el potencial será positivo si el switch de la polaridad es negativo y viceversa.

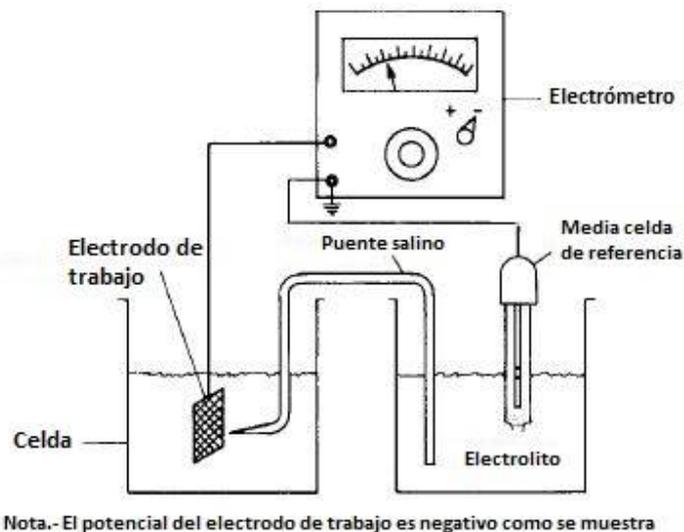


Fig. 5 Diagrama esquemático de un aparato de medición del potencial de un electrodo de trabajo. [REF: ASTM Designation G 3-89 fig. 1 pág. 2]

3.2.3 Convención de signos para coeficientes de temperatura para potencial de electrodos.

Hay dos tipos de coeficientes de temperatura de potencial de electrodo: coeficientes de temperatura isotérmicos y coeficientes de temperatura térmicos. La convención del signo recomendado para ambos tipos es que el coeficiente se hace más positivo cuando hay un incremento en la temperatura del potencial del electrodo.

3.2.4 Convención de signos para corriente y densidad de corriente

Se recomienda el signo por convención en el cual las corrientes anódicas y la densidad de corriente son positivas y en el caso de las corrientes catódicas y la densidad de corriente, son negativas. Cuando el potencial es trazado contra el logaritmo de la densidad corriente, sólo el valor absoluto de la densidad de corriente puede ser trazado. En tales gráficos, los valores a los cuales es catódico, debe ser claramente diferenciado de los valores anódicos si ambos son presentados.

3.2.5 Convenciones para mostrar datos de polarización

Convención de signos. Se recomienda la práctica estándar de gráficos matemáticos para mostrar los datos de corrosión. En gráficos logarítmicos, el valor de las abscisas se incrementa de izquierda a derecha y las ordenadas de abajo hacia arriba.

Gráficos densidad de corriente-potencial. Se recomienda una convención uniforme para graficar datos de densidad de corriente contra potencial, a lo largo de las abscisas llamado densidad de corriente y potencial a lo largo de las ordenadas. En estos gráficos, la densidad de corriente puede ser trazada en ejes lineales o logarítmicos. En general, los gráficos logarítmicos son más adecuados para incorporación de intervalos amplios de densidad de corriente para demostrar las relaciones de Tafel. Los gráficos lineales son recomendados para estudios en los cuales el intervalo de la densidad de corriente o el potencial son pequeños, o en casos en donde es importante el cambio en la región donde la densidad de corriente cambia de anódica a catódica. También son usados estos gráficos lineales para determinar la resistencia a la polarización R_p la cual es definida como la pendiente del gráfico de densidad de corriente contra potencial en el potencial de corrosión E_{corr} . La relación entre la resistencia a la polarización R_p y la densidad de corriente i_{corr} se representa con la ec. (1):

$$\left[\frac{d(\Delta E)}{di} \right]_{\Delta E=0} = R_p = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c) i_{corr}} \quad \dots (1)$$

Donde:
 b_a = Pendiente anódica de Tafel
 b_c = Pendiente catódica de Tafel y,

ΔE = la diferencia de potencial $E - E_{corr}$. Donde E es el potencial cuando se está polarizando y E_{corr} es el potencial de la muestra sin polarización.

La siguiente figura (fig. 6) es un gráfico de polarización de $E - E_{corr}$ contra densidad de corriente i , donde la resistencia a la polarización R_p ha sido determinada como la pendiente de la curva en el potencial de corrosión E_{corr} .

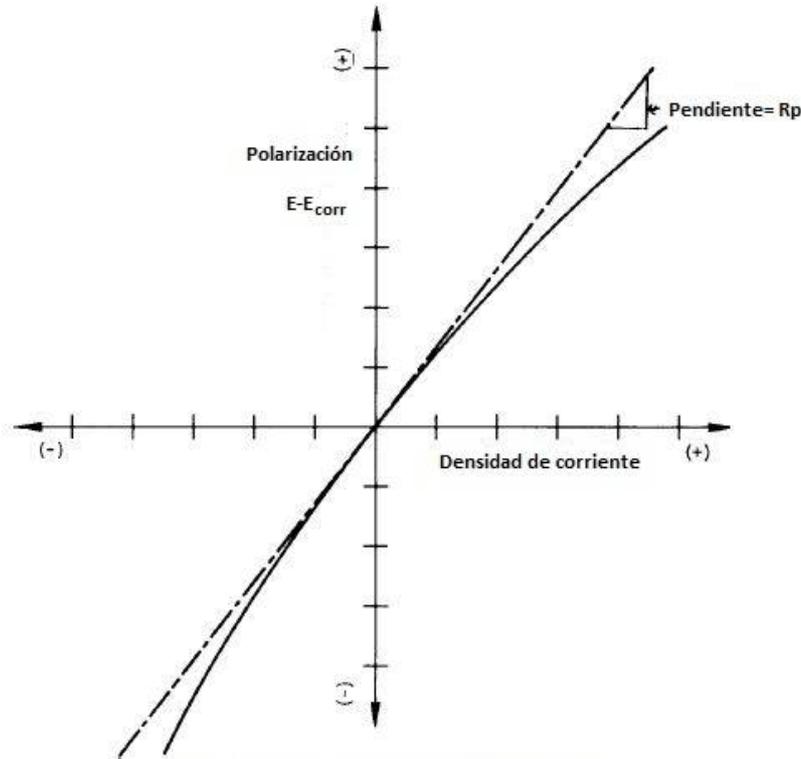


Fig. 6 Gráfico lineal hipotético de polarización. [REF: ASTM designation G 3-89fig. 2 pág. 3)

Puntos de referencia de potencial. En gráficos donde el potencial del electrodo es mostrado, se recomienda mostrar la conversión de valores tanto del electrodo estándar de hidrógeno como del electrodo saturado de calomel si tales valores son conocidos (fig. 6). Por ejemplo, cuando el potencial de hidrógeno es trazado en las ordenadas, entonces el electrodo de calomel podría ser mostrado del lado extremo izquierdo del gráfico y la escala del electrodo de calomel del lado extremo derecho. Una alternativa, en caso de que el electrodo no es de hidrógeno ni calomel, sería mostrar en el eje del potencial los potenciales de estos electrodos

contra el de referencia utilizado. En casos donde estos puntos no están mostrados, una conversión algebraica podría indicarlo.

Unidades. La unidad recomendada para el potencial es el volt. En casos donde sólo se trata de intervalos pequeños de potencial, se puede usar milivolts o microvolts. Las unidades del SI para la densidad de corriente son ampere sobre metro cuadrado o miliampere sobre centímetro cuadrado.

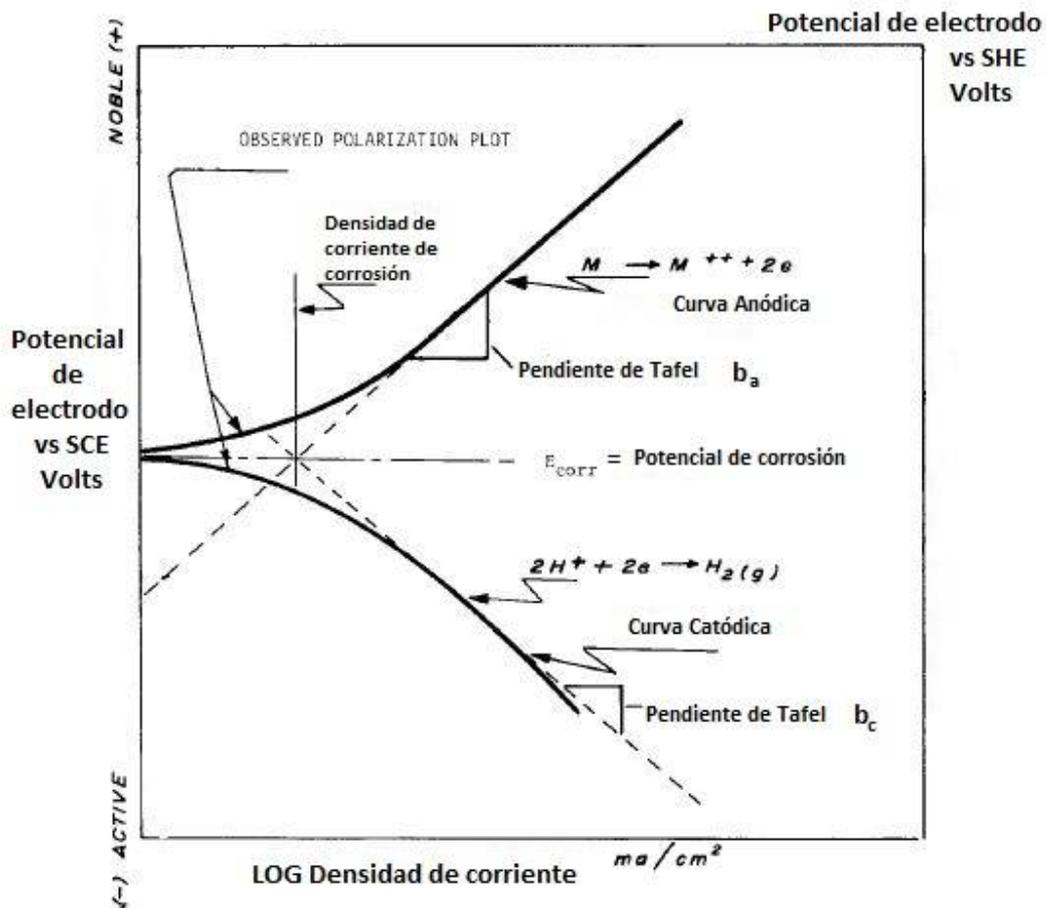


Fig. 7 Diagrama hipotético de polarización anódica y catódica. [REF: ASTM designation G 3-89fig. 3 pág. 4)

3.2.6 G 59 Realización de las pruebas de la resistencia a la polarización potenciodinámicas.

Este método describe un procedimiento experimental para las mediciones de la resistencia a la polarización, el cual puede ser utilizado para calibración del equipo y verificación de la técnica experimental. Este método puede proveer potenciales de corrosión reproducibles así como medidas de resistencia a la polarización.

Esta prueba puede ser utilizada para verificar el desempeño de las medidas de la resistencia a la polarización incluyendo los electrodos, celdas electroquímicas, potencióstatos, generadores de barrido, medidas y dispositivos de almacenaje. Este método también es útil para operadores en entrenamiento para la preparación de muestras y técnicas experimentales para medidas de la resistencia a la polarización.

La resistencia a la polarización puede ser relacionada con la velocidad general de corrosión para metales en o cerca del potencial de corrosión, E_{corr} . Las mediciones de la resistencia a la polarización son una manera rápida para medir la velocidad general de corrosión. El seguimiento en tiempo real de la corrosión es una aplicación muy común. La técnica también puede ser usada como una manera de clasificar aleaciones, inhibidores, etc. para resistencia a la corrosión.

En este método, un potencial pequeño $\Delta E(t)$, definido con respecto al potencial de corrosión ($\Delta E = E - E_{corr}$) es aplicado al metal muestra. Las corrientes resultantes son registradas. La resistencia a la polarización, R_p , de un electrodo corroído se define en la siguiente ecuación como la pendiente del potencial contra la densidad de corriente en $i=0$.

$$R_p = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial i} \right)_{i=0, dE/dt \rightarrow 0} \quad \dots (2)$$

La densidad de corriente está dada por i , la densidad de corriente, i_{corr} , está relacionada con la resistencia a la polarización por el coeficiente Stern-Geary, B ,

$$i_{corr} = 10^6 \frac{B}{R_p} \quad \dots (3)$$

La dimensión de R_p es ohm-cm^2 , i_{corr} , es mA/cm^2 y B está en volts. El coeficiente Stern-Geary está relacionado con las pendientes b_a anódica y b_c catódica como:

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad \dots (4)$$

Las unidades de las pendientes de Tafel son volts. La velocidad de corrosión, CR , en mm por año puede ser determinado de la ec. 4 en la cual EW es el equivalente en peso de la muestra corroída en gramos y ρ es la densidad del material corroído en g/cm^3 .

$$CR = 3.27 \times 10^{-3} \frac{i_{corr} EW}{\rho} \quad \dots (5)$$

Este método de prueba puede no ser apropiado para medir la resistencia a la polarización en todos los materiales y en todos los ambientes.

3.3 Verificación de la calibración.

Antes de llevar a cabo las correspondientes medidas de polarización, el potencióstato debe ser probado para un correcto funcionamiento. Para este propósito, se debe conectar el potencióstato a un circuito eléctrico. Utilizar una resistencia de 100Ω , establecer en el potencióstato un potencial de 30.0mV y aplicarlo. La corriente debe ser de 3.0mA por la ley de Ohm $I=E/R$.

Ahora registrar una curva de polarización potenciodinámica a una tasa de escaneo de 0.6V/h de $\Delta E = -30\text{mV}$ a $\Delta E = +30\text{mV}$ y regresar a $\Delta E = -30\text{mV}$. El gráfico debe ser lineal, pasar a través del origen y tener una pendiente de 10Ω . Las curvas registradas de ida y venida deben ser idénticas.

3.4 Procedimiento experimental

En todos los casos de la experimentación se utilizó una solución al 3% en peso de NaCl. Para cada material (Al 2024 y Al 7075), se hicieron pruebas por triplicado en cada una de las experimentaciones, esto es: tres de potencial contra tiempo, tres de R_p contra tiempo, tres de curvas anódicas cíclicas y tres de curvas catódicas, para cada aleación. La celda utilizada, de policarbonato, contiene un área de contacto del electrolito con el electrodo de trabajo de un centímetro cuadrado.

Los primeros experimentos consistieron en pruebas de Potencial contra tiempo utilizando el potencióstato Gill. La duración de la prueba fue de una hora y, como se indica en la designación de la ASTM, G59, se verificó la calibración del equipo con un circuito eléctrico. Al durar una hora la experimentación, se tomó una lectura por segundo y así obtener 3600 puntos para cada prueba.

Posteriormente se llevó a cabo las pruebas de R_p contra tiempo. Esta prueba potencióstática se realizó en el potencióstato Vimar y, al igual que en el Gill, también se verificó la calibración con un circuito eléctrico. Primero se registró el valor del potencial de corrosión y ya establecido se polarizó $\pm 20\text{mV}$, y a cada valor de sobrepotencial le correspondió un valor de corriente, los cuales fueron también registrados en estado estacionario. Esto se llevó a cabo por dos horas y, en lapsos de 15 minutos, se registraron los valores antes mencionados.

Las curvas potenciodinámicas anódicas cíclicas se realizaron en el potencióstato Gill. Para estas pruebas se esperó a que la celda alcanzara un potencial de

corrosión estable y a partir de ese momento se barrieron 800 milivolts en dirección anódica a una velocidad de barrido de 10mV/min, para posteriormente completar el ciclo haciendo el barrido de 500 milivolts en dirección catódica (en sentido contrario al inicial). De esta manera se esperaría encontrar el punto del potencial de picadura al momento en que se cruzaran ambas curvas.

Por último se realizaron las curvas potenciodinámicas catódicas, que es prácticamente el mismo procedimiento que para las curvas potenciodinámicas anódicas, con la diferencia de que el barrido se lleva a cabo en dirección catódica y no son cíclicas. La velocidad de barrido en estas curvas fue también de 10mV/min, barriendo un sobrepotencial de -500mV.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1 RESULTADOS

A continuación se presentarán los gráficos resultantes por triplicado para cada una de las pruebas. Gráficos de Potencial contra tiempo, Resistencia a la polarización, Curvas anódicas potenciodinámicas cíclicas y Curvas catódicas. Lo anterior será presentado para cada una de las aleaciones correspondientes.

La figura 8 muestra la variación de potencial en función del tiempo para tres probetas distintas de Al 2024, de acuerdo a lo descrito en la sección de procedimiento experimental en una solución al 3% de NaCl. En la figura 9 se aprecia la variación, por triplicado del potencial en función del tiempo para una aleación Al 7075 en solución de NaCl.

Las variaciones de R_p en función del tiempo se han presentado en este trabajo como gráficas E vs I, indicando de manera implícita el tiempo transcurrido (Figura 10) y como gráfica de R_p vs t (Figura 11) para la aleación Al 2024 en solución de NaCl 3% en peso. También se muestra el gráfico de E_{corr} contra tiempo (Fig. 12). Los resultados, presentados de manera similar, para la aleación Al 7075 se muestran en las figuras 13, 14 y 15.

Las curvas anódicas cíclicas están presentadas más adelante como las figuras 16 y 17 para las aleaciones Al 2024 y Al 7075 respectivamente. Para ambos casos, las pruebas se llevaron a cabo por triplicado en una solución de NaCl al 3% en peso.

Las figuras 18 y 19 muestran las curvas catódicas para cada aleación. De igual manera se hizo por triplicado para cada Aleación de Aluminio (2024 y 7075) y en la misma solución (NaCl al 3% en peso).

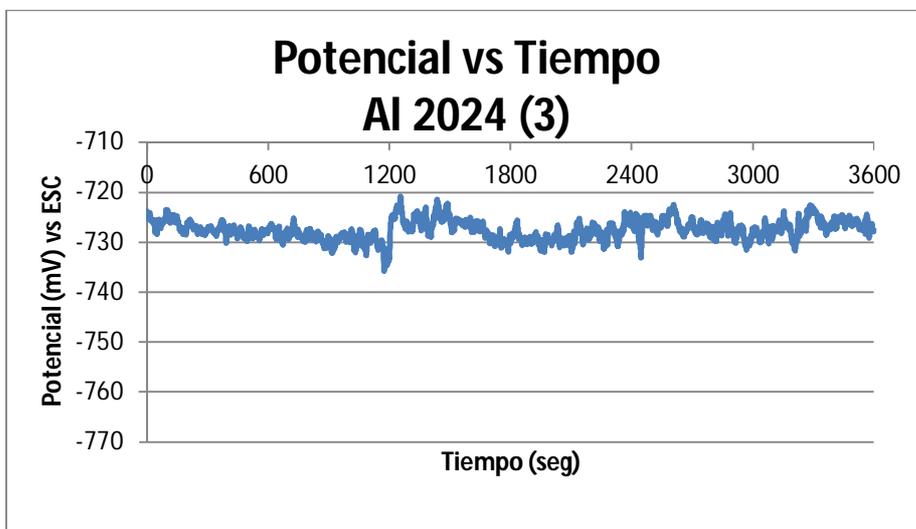
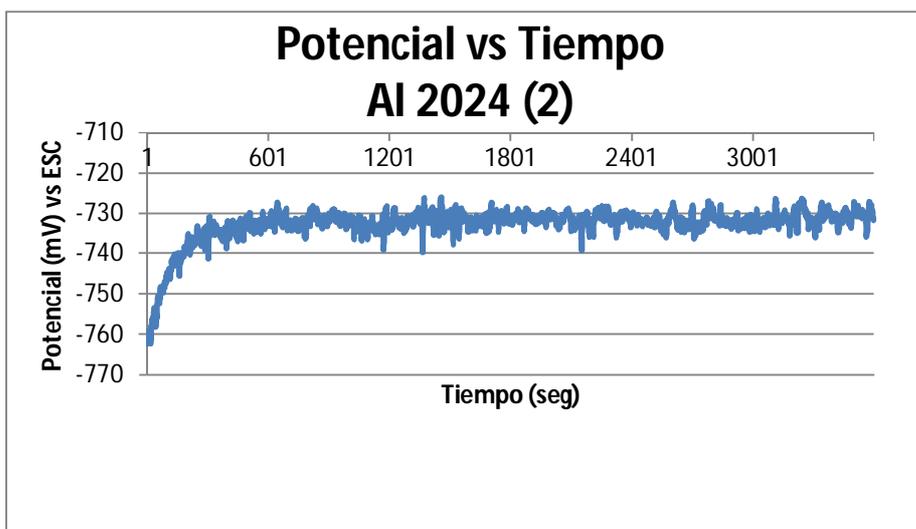
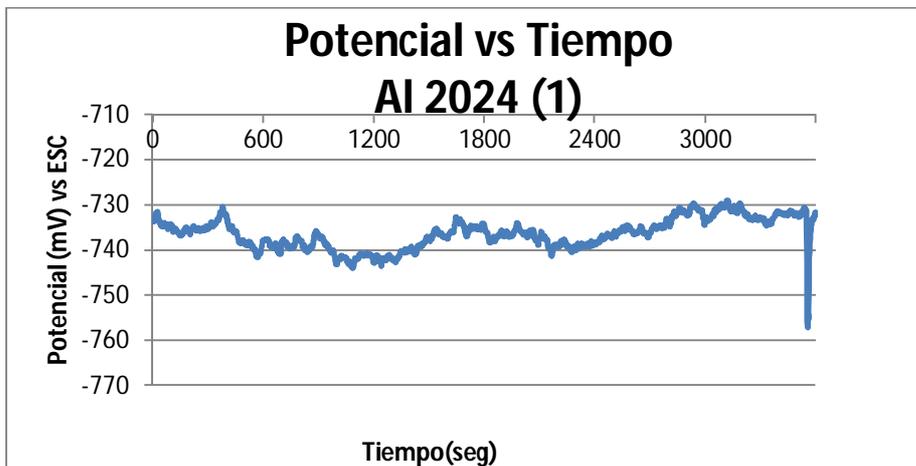


Figura 8. Variación del potencial de una aleación Al 2024, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

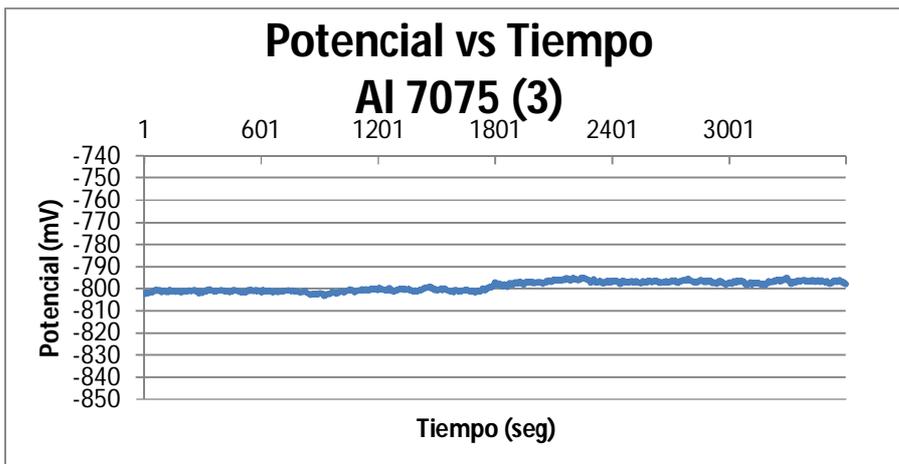
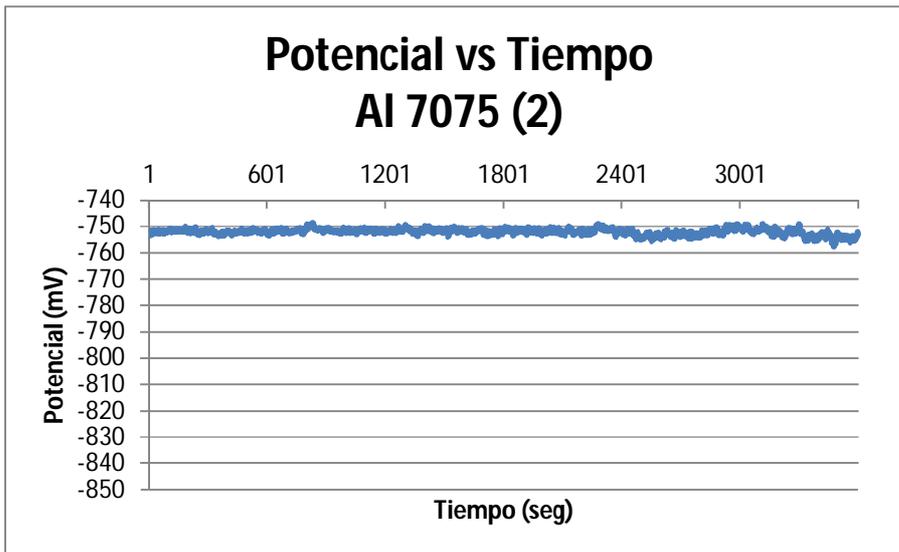
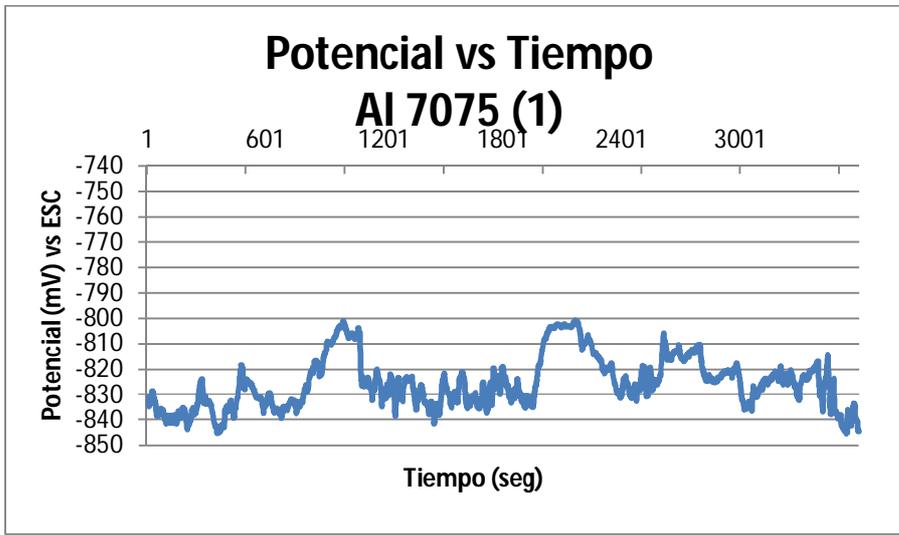


Figura 9. Variación del potencial de una aleación Al 7075, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

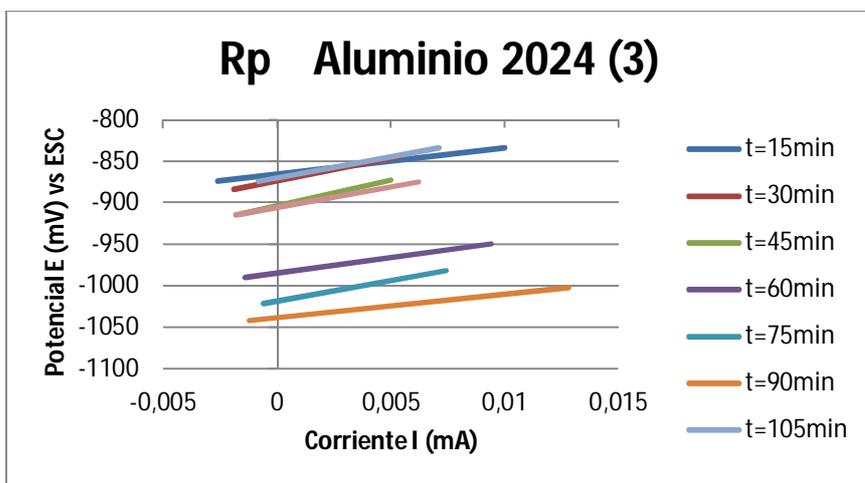
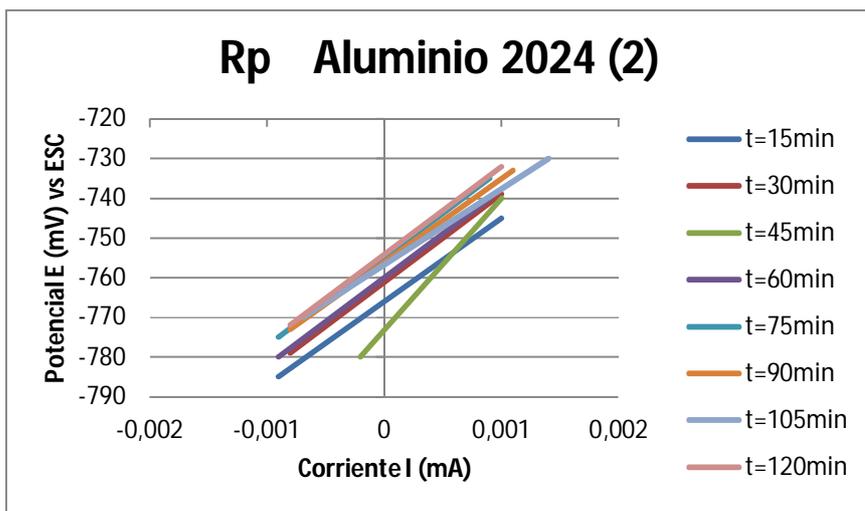
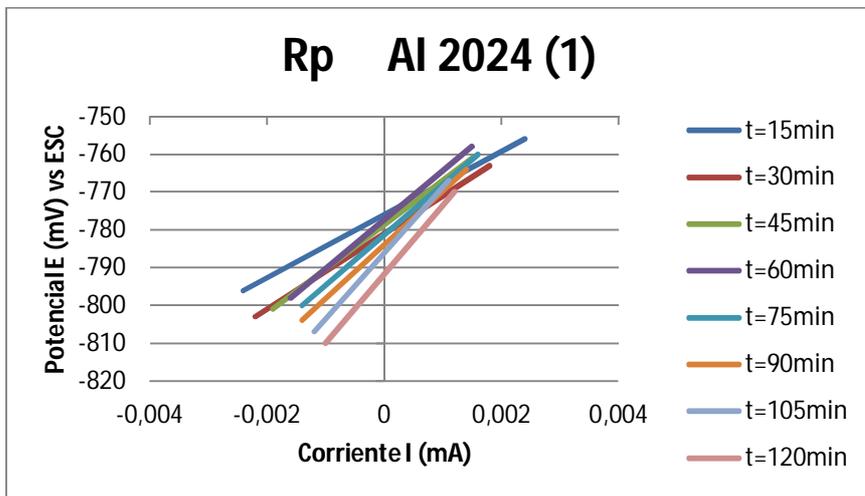


Figura 10. Variación de la pendiente R_p a distintos tiempos de una aleación Al 2024, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

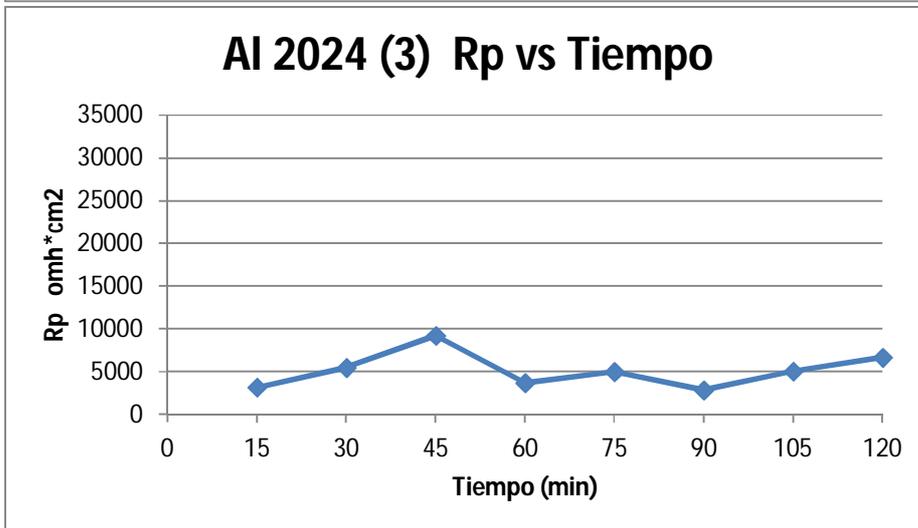
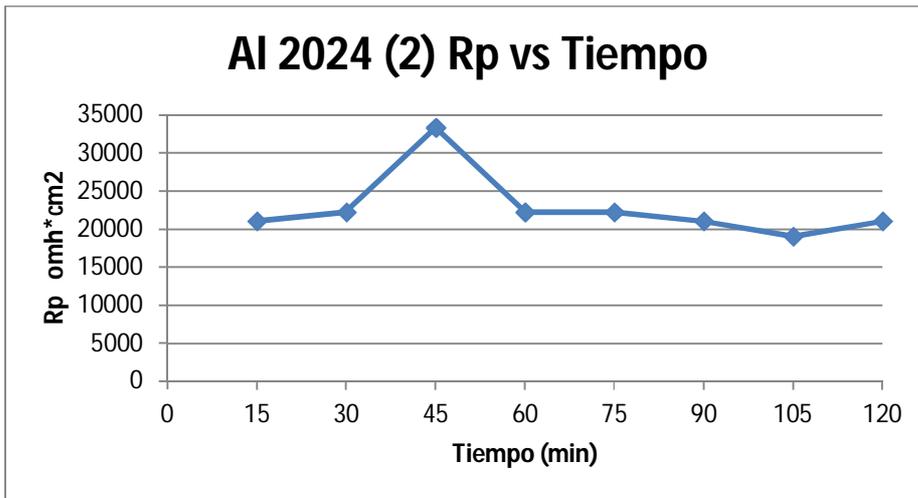
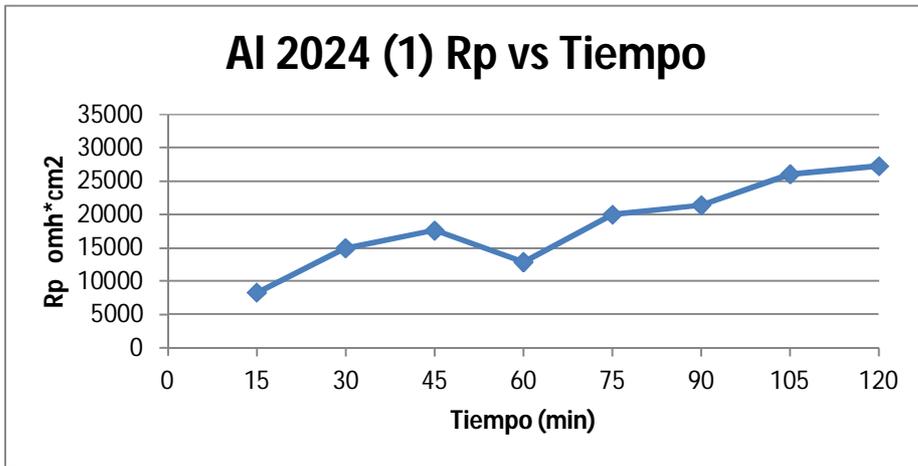


Figura 11. Valores de Rp a distintos tiempos de una aleación Al 2024, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

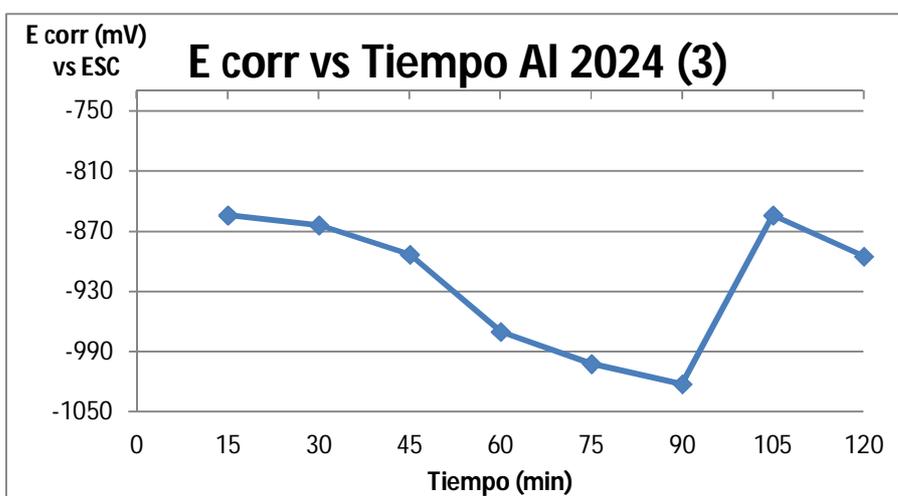
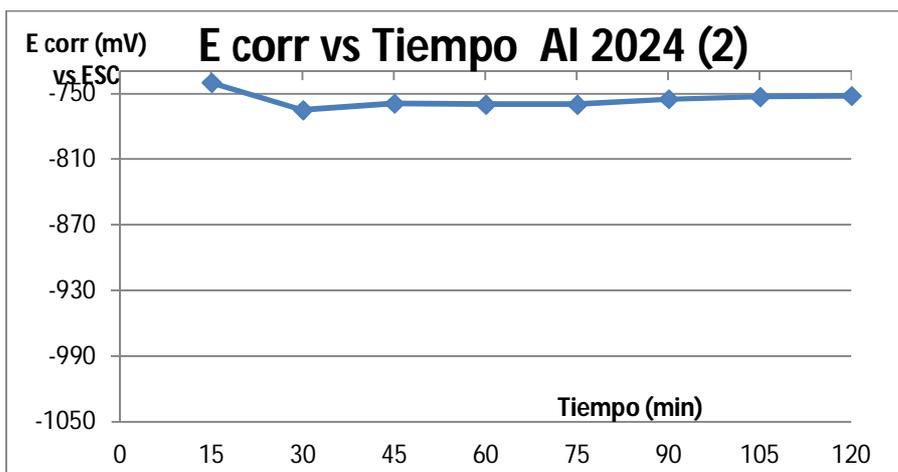
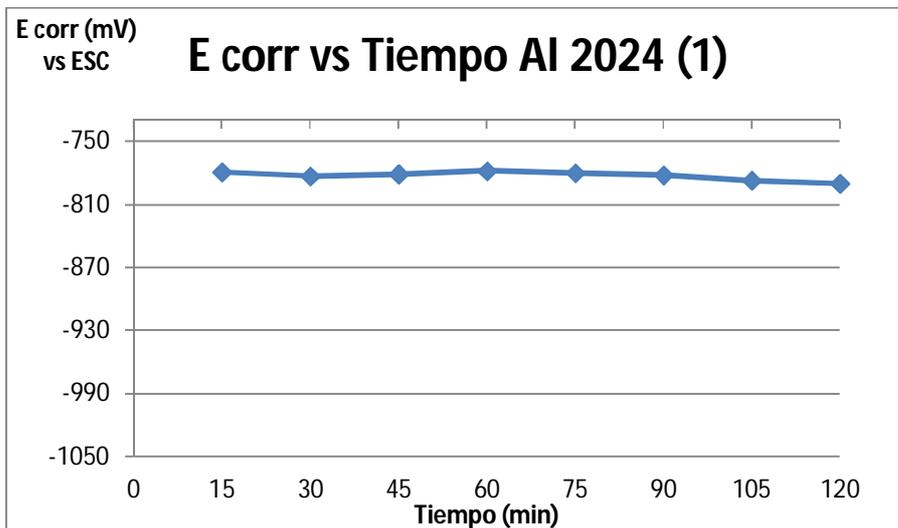


Figura 12. Valores de E_{corr} a distintos tiempos de una aleación Al 2024, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

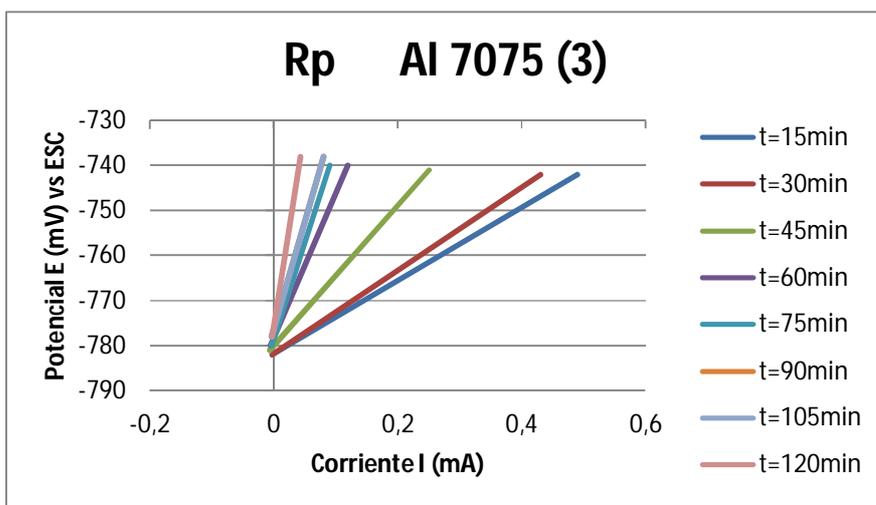
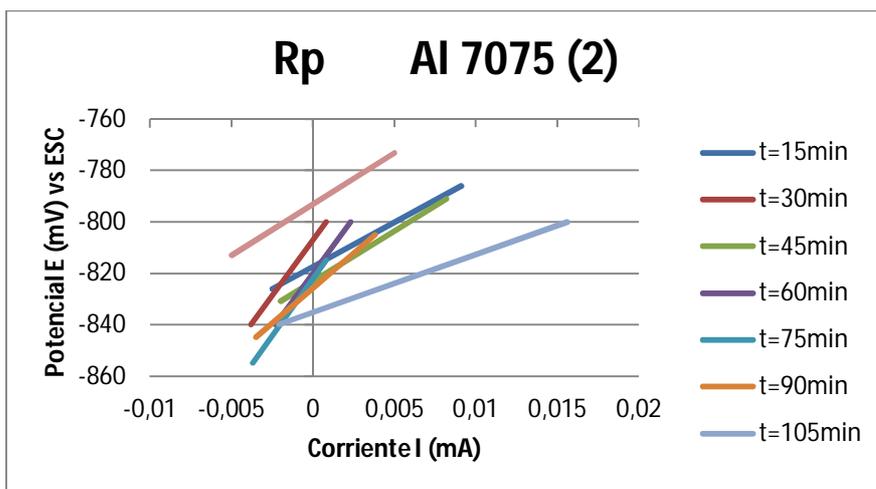
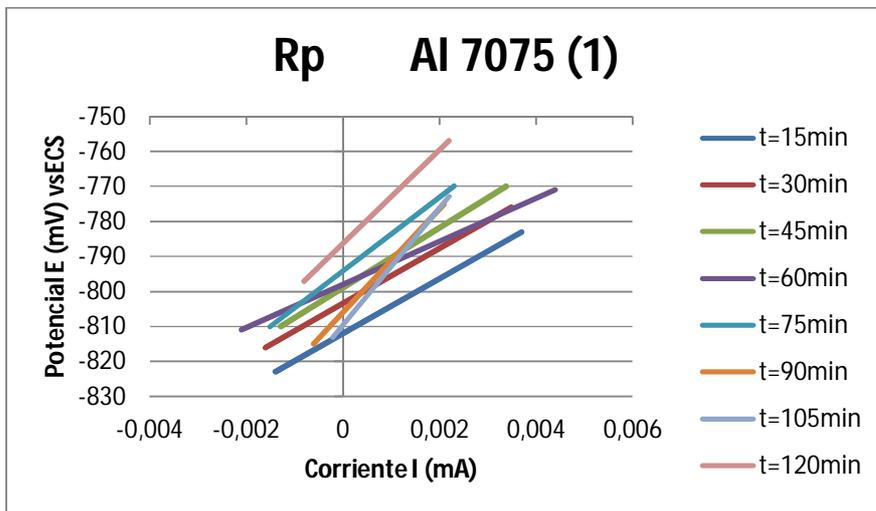


Figura 13. Variación de la pendiente R_p a distintos tiempos de una aleación Al 7075, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

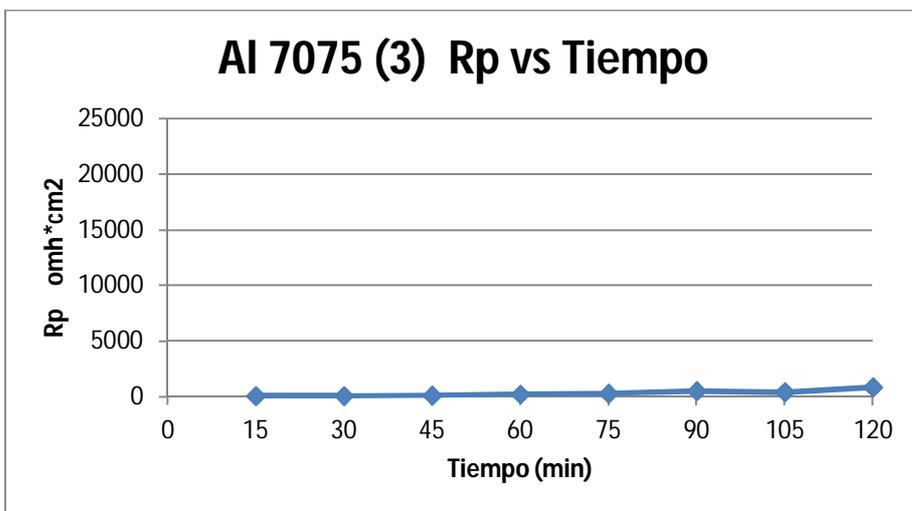
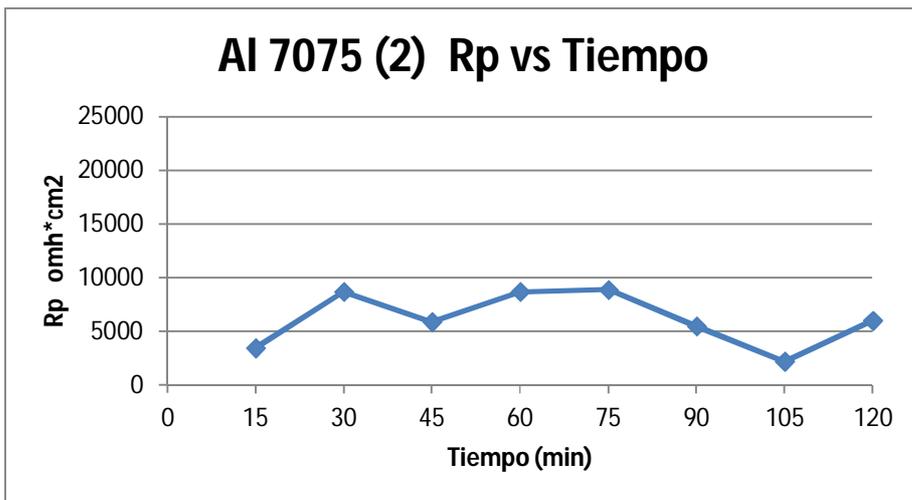
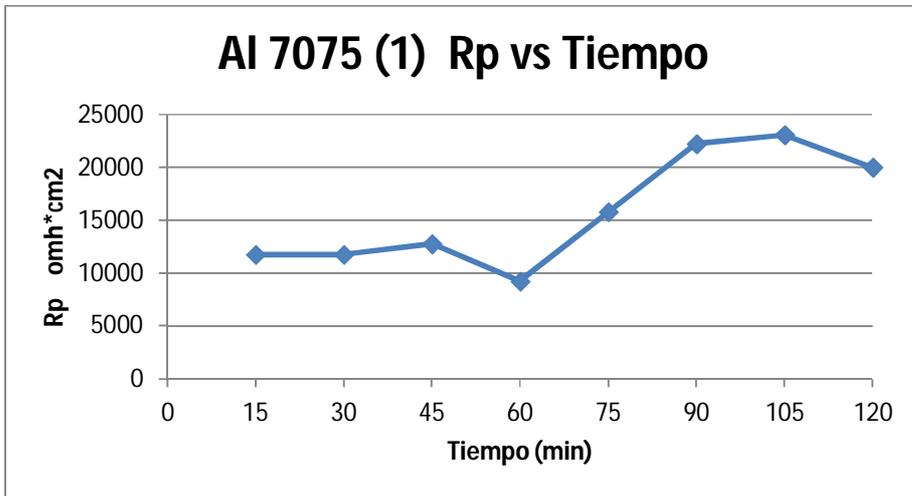


Figura 14. Valores de Rp a distintos tiempos de una aleación Al7075, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

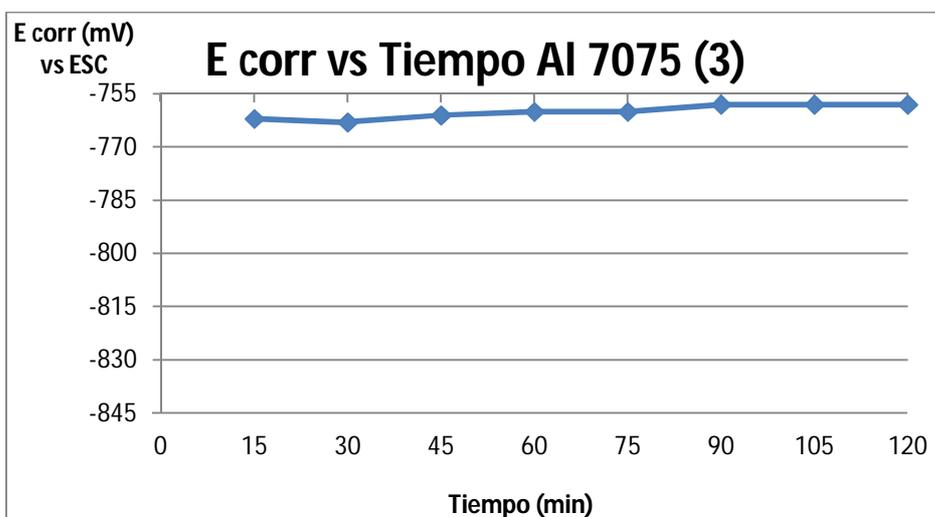
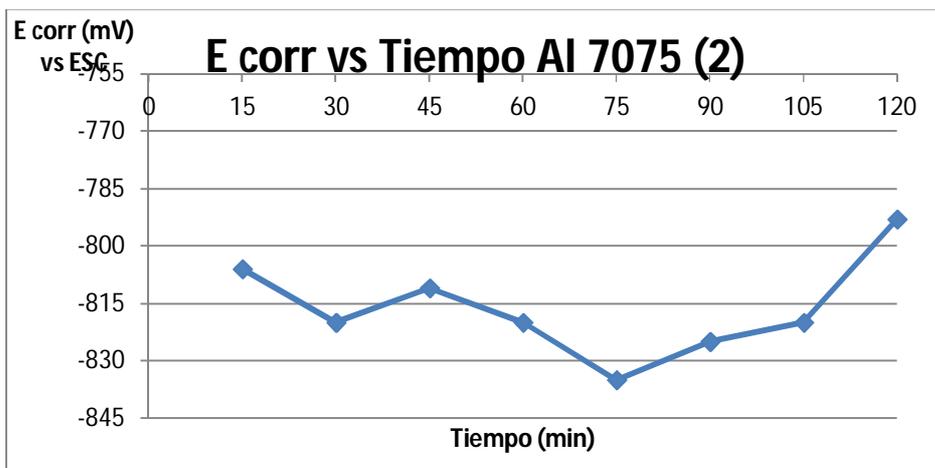
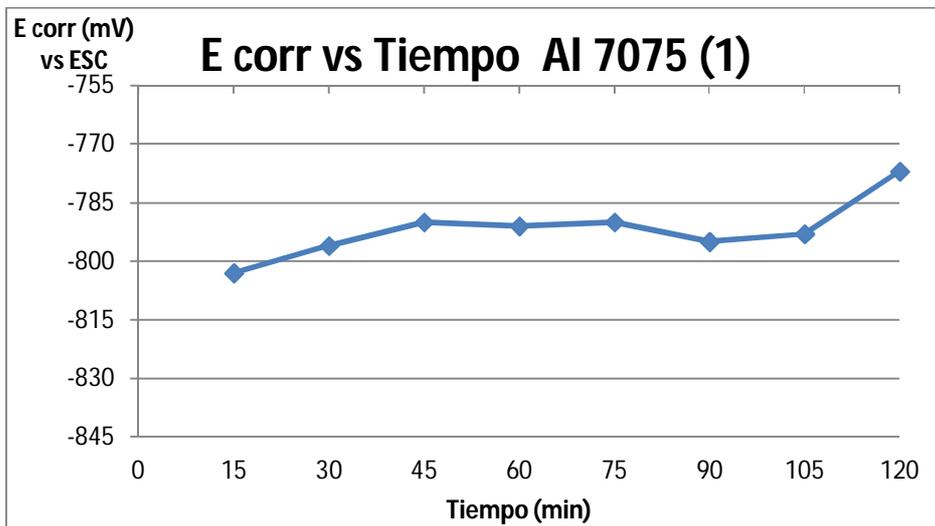


Figura 15. Valores de E_{corr} a distintos tiempos de una aleación Al 7075, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

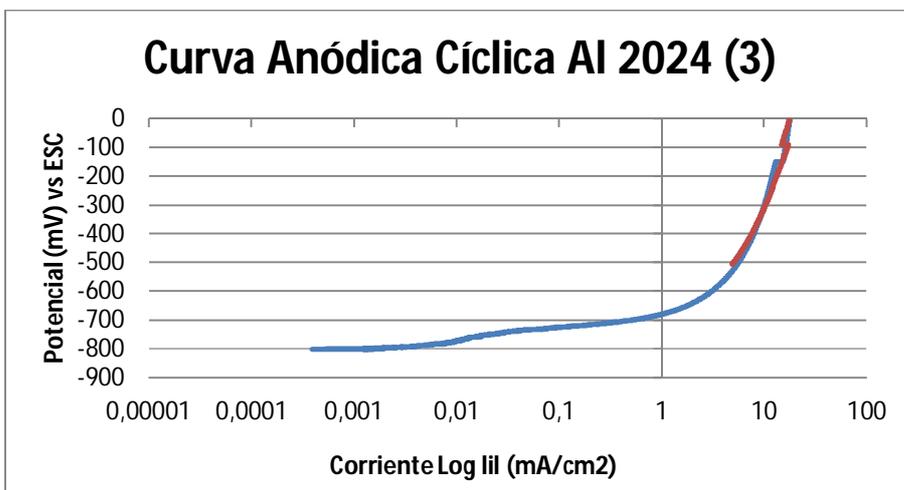
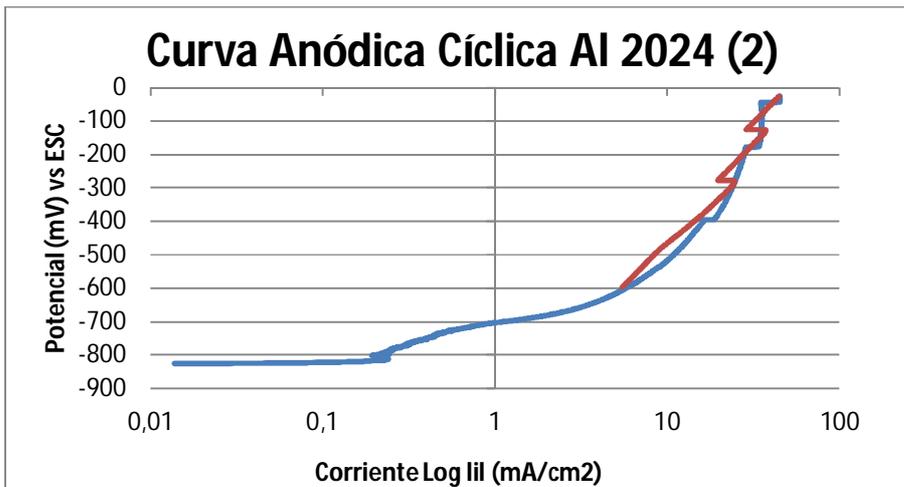
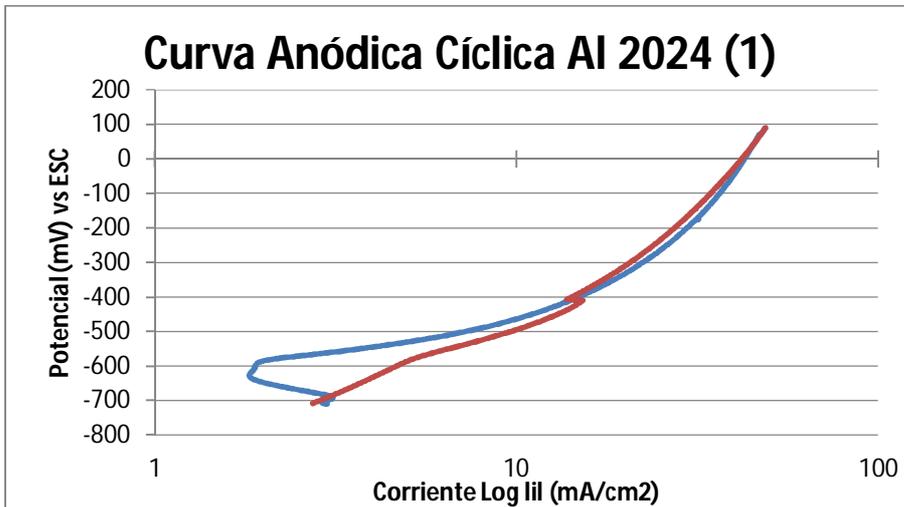


Figura 16. Curvas anódicas cíclicas de una aleación Al 2024, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

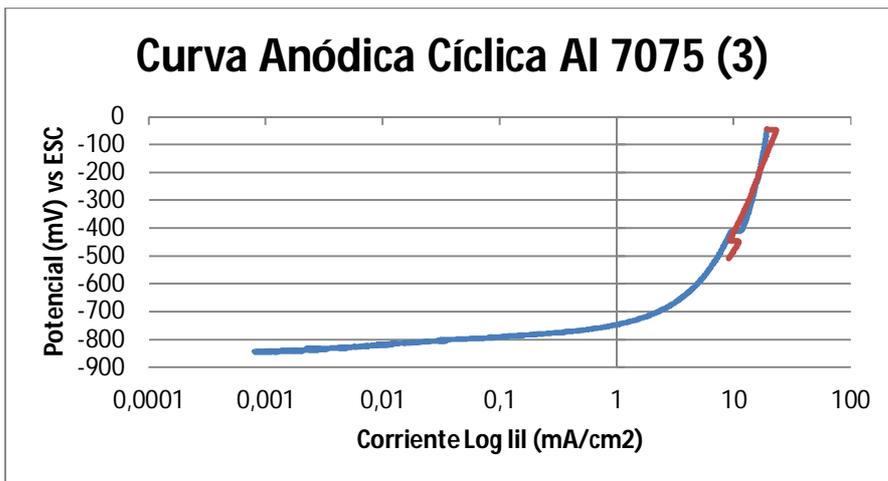
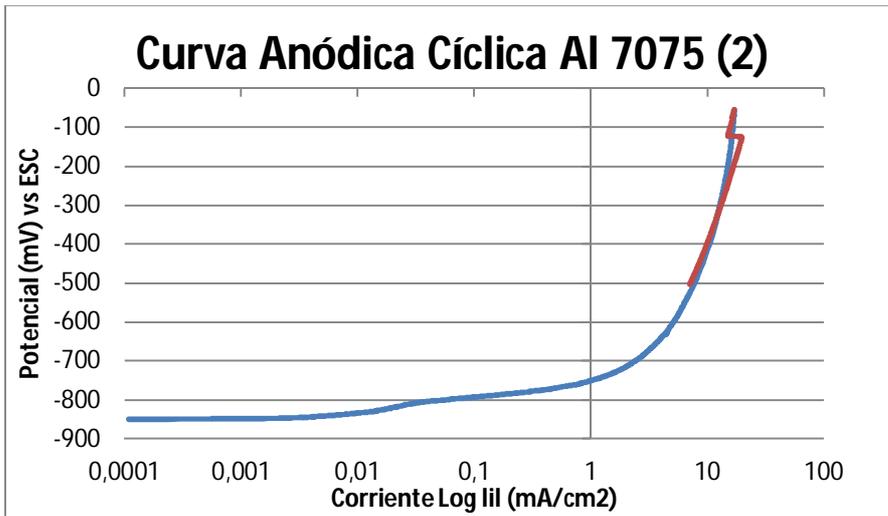
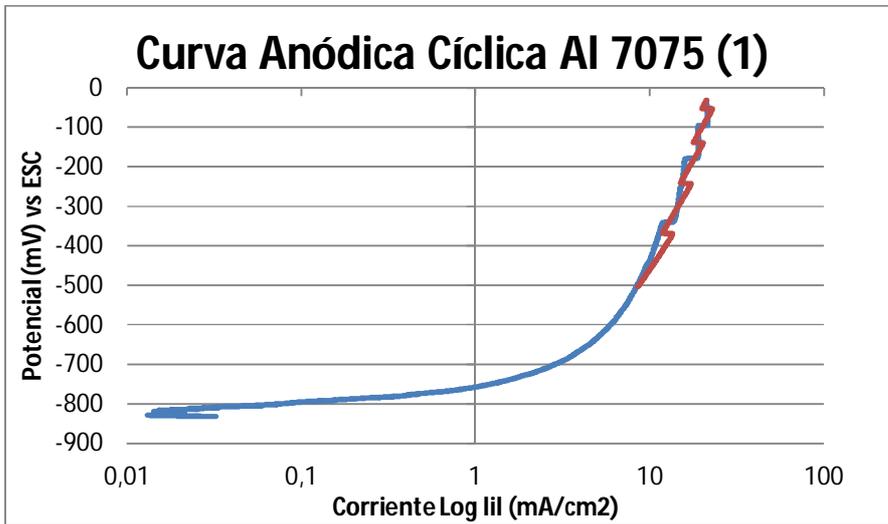


Figura 17. Curvas anódicas cíclicas de una aleación Al 7075, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

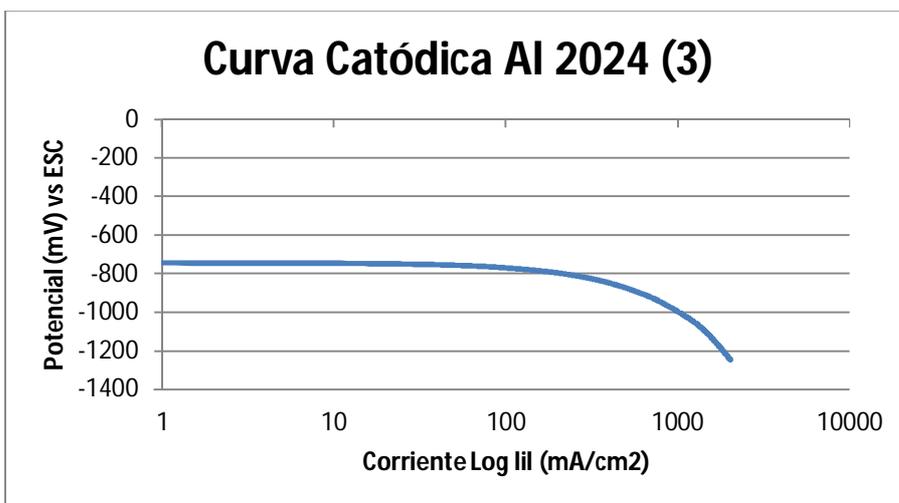
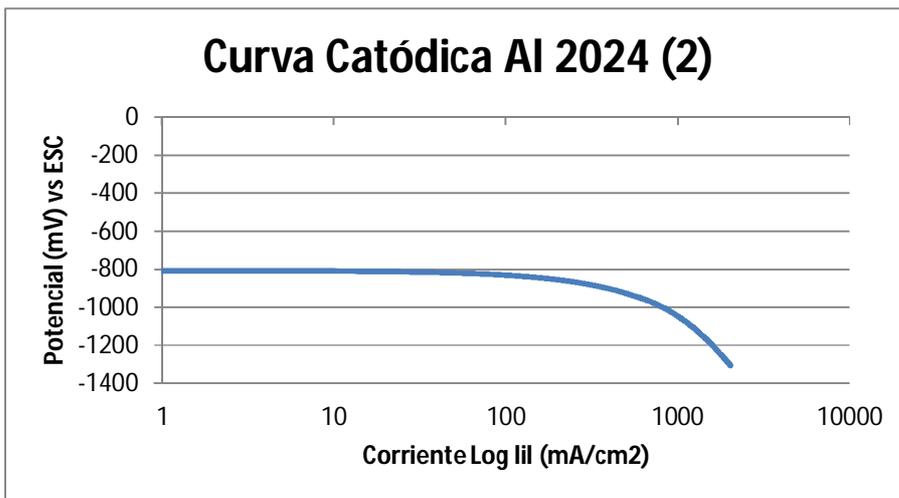
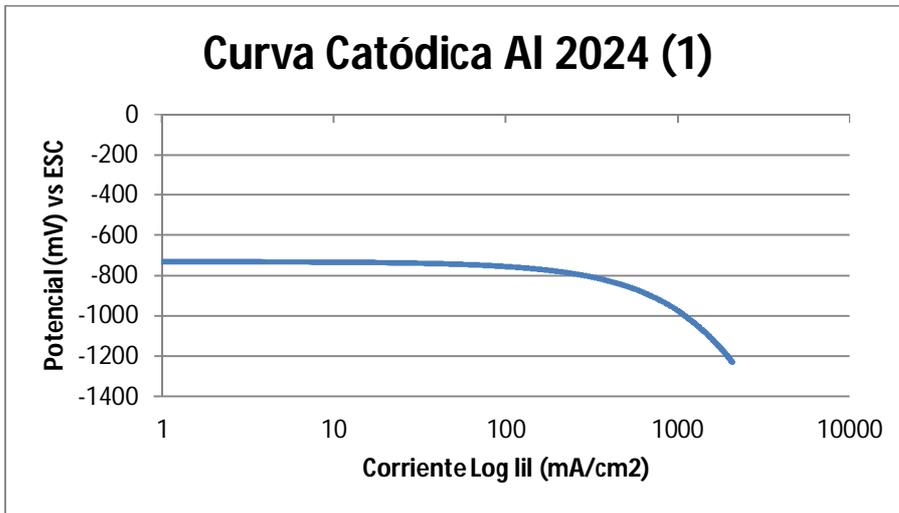


Figura 18. Curvas catódicas de una aleación Al 2024, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

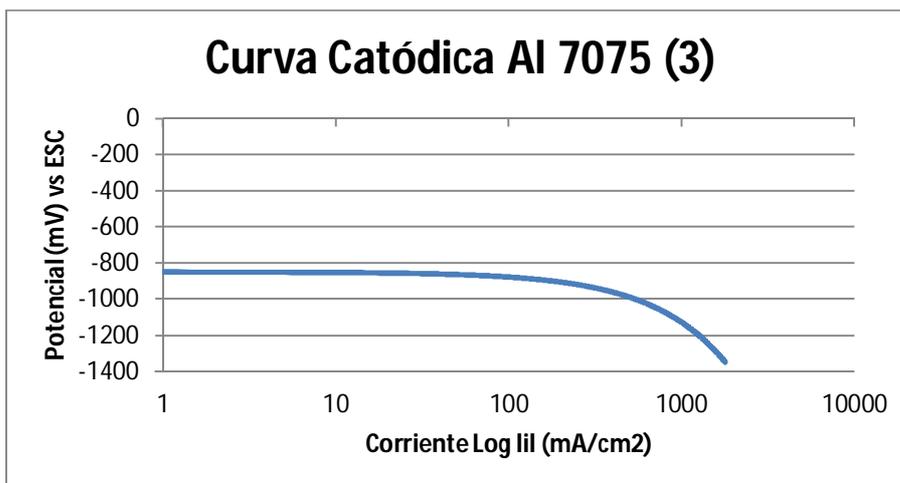
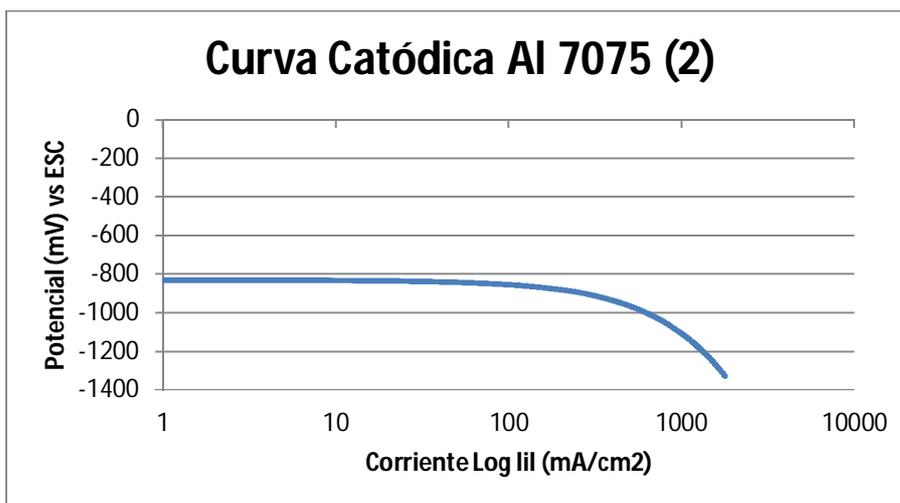
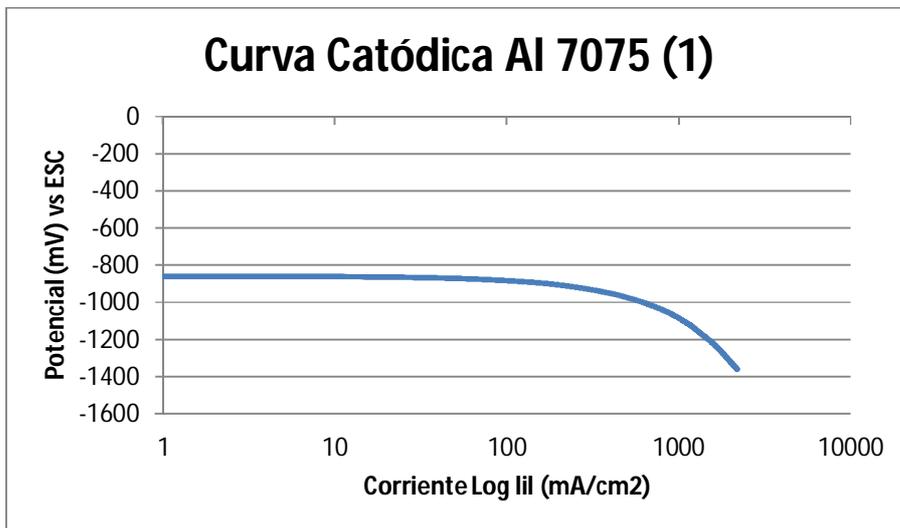


Figura 19. Curvas catódicas de una aleación Al 7075, por triplicado, en solución de NaCl 3% en peso.

4.2 ANÁLISIS

4.2.1 Potencial contra tiempo.

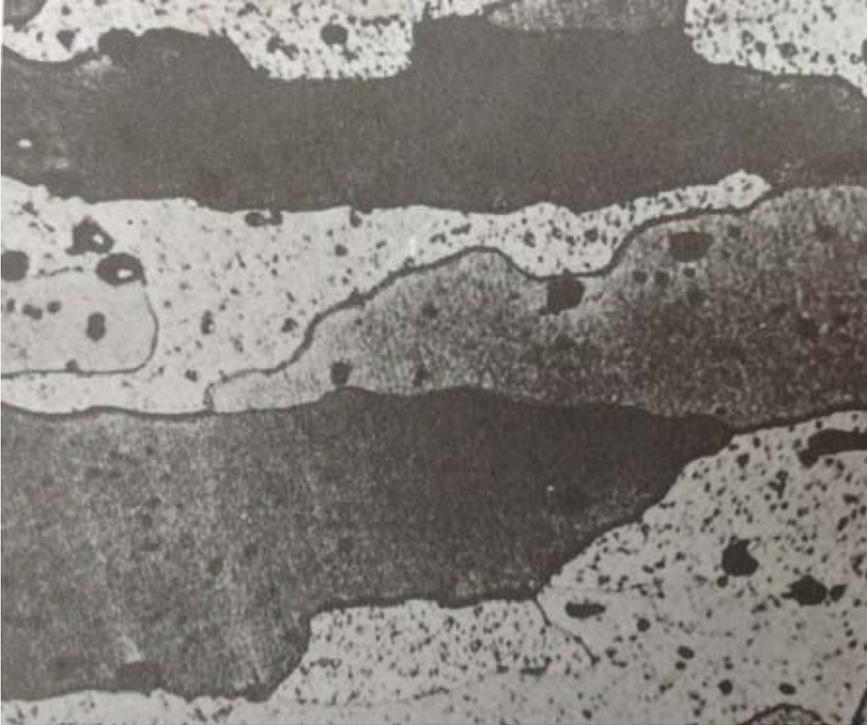
Las gráficas de Potencial contra tiempo muestran una variación más marcada en el caso de la aleación de Aluminio 7075 (fig. 9), que aunque las probetas muestran un comportamiento constante a lo largo de la prueba, exceptuando la primera (Al 7075 (1)), los valores de potencial promedio se encuentran más separados entre sí. Dicha variación, que encuentra su valor más positivo en la segunda probeta alrededor de -750 mV, llega a su valor más negativo en la probeta 1, alrededor de -845 mV aproximadamente. Ésto representa una variación de alrededor de 100 mV. La variación en los valores posiblemente se debió a la superficie de las probetas, es decir, que presentaron discrepancia en cuanto a la homogeneidad del material, siendo así la causa del desplazamiento del potencial en las pruebas bajo las mismas condiciones (ver fig. 20 para homogeneidad en la estructura del material). Como se indicó anteriormente, la probeta Al7075 (1) arrojó resultados "menos constantes", debido a variaciones de potencial obtenido al realizar la prueba y aun de esta manera se puede localizar valores promedio entre -840 y -830 mV. La segunda y tercera probeta del mismo material muestran un comportamiento "más constante", pero con una variación en el valor de potencial promedio de 50 mV entre ellas. De hecho, en la literatura se ha establecido que la presencia de distintas fases en una aleación, así como de segregaciones o impurezas, resultan en variaciones de potencial.

En el caso de la aleación de Aluminio 2024 (cuya composición química se asemeja bastante a la composición nominal de dicha aleación, a diferencia del caso del Aluminio 7075), las gráficas muestran menos variación en los valores de potencial (fig. 8), encontrándose el valor más negativo en -745 mV y el más positivo en -720 mV con una diferencia de alrededor de 25 mV únicamente, aunque en estas pruebas son más notables los picos de potencial obtenidos en las pruebas. La probeta Al 2024 (2) muestra claramente el efecto de una discrepancia

en la superficie diferente al inicio de la prueba y se debe a heterogeneidades en la superficie de la aleación, pues aunque en la práctica se trabajó en las mismas condiciones que con las otras, esta pieza muestra un inicio de potencial más activo, para después mostrarse "constante" con picos de potencial a lo largo de ella. La probeta Al 2024 (1) muestra más variaciones de potencial a lo largo de la prueba (ver fig. 20 para homogeneidad en la microestructura del material).

El hecho de hacer por triplicado los ensayos electroquímicos resulta en la obtención de resultados más representativos del comportamiento del material bajo ciertas circunstancias, para ver si son reproducibles, aunque en muchas ocasiones las condiciones similares no son suficientes para obtener resultados reproducibles y muestra de ello son las gráficas presentadas anteriormente. La principal causa podría ser la superficie del material, que es heterogénea en su composición, y en consecuencia, en la distribución de zonas anódicas y catódicas. Sin embargo, también depende de la preparación de la superficie y de la composición química de dichas aleaciones.

a)



b)



Fig. 20. Imágenes de típicas microestructuras correspondientes a a)Al2024-T3, 500X y b)Al7075-T6, 350X (ref: ASM Handbook. Formerly Ninth edition, Metals Handbook, Vol. 9 "Metallography and Microstructures").

4.2.2 Resistencia a la polarización

Aleación 2024

Para este caso, se obtuvieron 3 gráficas para cada aleación por triplicado, dando un total de 9 gráficas para cada material. Un primer vistazo muestra que sólo una probeta, la Al 2024 (3) se mostró más activa, provocando una mayor corrosión en su superficie, ya que los valores de R_p son muy bajos en comparación con las otras 2 probetas (fig. 11), lo cual avala que la aleación es heterogénea. En la figura 11 se nota claramente la discrepancia en valores de potencial para la tercer probeta, la cual llega a alcanzar valores desde un potencial de alrededor de -860 mV vs ECS hasta -1020mV vs ECS, variando continuamente, muestra de una mayor corrosión en comparación con las dos primeras, que arrojan valores similares entre sí, alrededor de entre -760 y -780 mV vs ECS. Lo anterior se ve también reflejado en la figura 9, cuyas pendientes son mayores en el caso de las dos primeras probetas, con valores de potencial relativamente más positivos y pendientes similares con una diferencia entre ellas relativamente pequeña.

En la probeta 1 de las figuras 10 y 11, al tiempo correspondiente a 120 minutos, se presenta la pendiente mayor o valor mayor de R_p y, a un tiempo de 15 minutos, corresponde la menor pendiente o el menor valor de R_p . Para el caso de la probeta 2 en las mismas figuras, el valor mayor de pendiente y R_p corresponde a 45 minutos y el valor menor se encuentra en 105 minutos, aunque dichas pendientes son muy similares entre sí. La probeta 3 muestra un comportamiento muy diferente en comparación con las dos primeras, encontrándose el valor mayor de pendiente en 45 minutos y el menor en 90 minutos. Lo anterior indica, por valores de R_p , que la tercera probeta fue corroída en mayor escala.

Aleación 7075

En los resultados obtenidos para el caso de la aleación 7075, hay una mayor discrepancia en cuanto a los valores de potencial de corrosión contra tiempo, principalmente en la tercera probeta (fig. 15). La primer probeta varía entre -805 y -780 mV mostrando una media de alrededor de -790mV y con una leve tendencia a hacerse menos negativo al tiempo correspondiente a 120 minutos. La segunda probeta se asemeja más a la primera, con valores que van desde -835 hasta -790 mV y con tendencia a aumentar al final de la prueba. Los valores de la tercer probeta se muestran anómalos, pues no reflejan un comportamiento consistente, ya que se obtienen valores menos negativos de potencial, pero valores de R_p muy bajos, indicando en una menor tasa de corrosión correspondiente a valores menos negativos de potencial (fig.15) y mayor corrosión para valores de R_p muy bajos en otra (fig. 14).

Las pendientes (fig. 13) de R_p para el caso de la probeta 1 muestran un desplazamiento hacia arriba del gráfico conforme aumenta el tiempo, no obstante las pendientes muestran cierta tendencia a comportarse de manera similar. La probeta 2 muestra que las pendientes están desplazadas entre sí, además con distinto valor de pendiente. La tercer probeta mostró anomalías y los valores contrastan entre los gráficos.

Los valores de R_p contra tiempo (fig.14) en la primer probeta son mayores, mostrando que presenta una menor corrosión en comparación con la segunda probeta y al mismo tiempo aumentando antes de finalizar la prueba pero disminuyendo ligeramente al final de ésta. La segunda probeta muestra valores menores con la primer probeta, clara indicación de que muestra mayor corrosión que la primera. Los valores de esta segunda probeta fluctúan continuamente. Los valores de la tercera probeta son muy bajos y anómalos.

Elaborando un diagrama esquemático de Evans-Tafel, se muestra que el potencial de corrosión aumenta con respecto al tiempo y de la misma manera la R_p también

4.2.3 Curvas anódicas cíclicas.

Las curvas anódicas, hechas también por triplicado, muestran que no se presentan picaduras para ninguna de estas pruebas. Los valores de potencial son muy similares para los tres casos, sin embargo, para valores altos de sobrepotencial, los valores de corriente son muy altos. Probablemente la película pasiva se rompió previamente al experimento, dando lugar a que no se apreciaran picaduras en la curva de polarización, pero al observar la probeta después del ensayo, era clara la presencia de corrosión localizada. En este caso se presenta control activacional, no hay corrientes límite (observar figuras 16 y 17).

4.2.4 Curvas catódicas.

Los resultados obtenidos para las curvas catódicas son muy similares, prácticamente no hay cambios entre ellas. Se muestra que no hay un control catódico, solamente hay activación hasta los potenciales empleados (ver figuras 18 y 19).

5. CONCLUSIONES

- En las aeronaves comerciales comunes, estas aleaciones ensayadas (2024 y 7075) presentan corrosión exfoliante en las zonas de alta humedad, de acuerdo a la literatura, desde el punto de vista electroquímico, en el laboratorio no se apreció susceptibilidad a la corrosión por picaduras en ninguna de las dos.
- En relación a las variaciones de potencial de corrosión con respecto al tiempo, éstas se han atribuido a la microestructura del material que muestra segregaciones en ambas aleaciones, lo que provoca distintas zonas anódicas y catódicas en cada probeta en función del tiempo.
- Con base en los resultados experimentales de potencial de corrosión y resistencia a la polarización, en función del tiempo, puede asegurarse que el proceso corrosivo está controlado anódicamente.
- De acuerdo a las curvas de polarización, parece que no existe control catódico, pues en todas las condiciones se presenta comportamiento tafeliano, en tanto que en la zona anódica, existen mayores cambios. Esto queda corroborado con el comportamiento de la E_{corr} y la I_{corr} en función del tiempo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- 1 ASM Handbook
Formerly Ninth Edition, Metals Handbook
Volume 9 “Metallography and Microstructures”
Fifth Printing February 1992
Pages 364-365; 368-369

- 2 Shreir, L. L. “Shreir corrosion”
Volume 4, Management and control of corrosión
Amsterdam; Elsevier; Academic 2010
Pages 3175-3197

- 3 ASM Handbook
“Corrosion”
Volume 13
9th edition, 1992
Pages 243-245

- 4 ASM Handbook
“Corrosion, Fundamentals, Testing and corrosion”
Volume 13a
2003
Pages 591-593

- 5 Designation G 3 -89 (Reapproved 1999)
Standard Practice for conventions Applicable to Electrochemical
Measurements in Corrosion Testing
ASTM

- 6 Designation: G 59 – 97
Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization
Resistance
Measurements
ASTM

- 7 Corrosion & Corrosion Control
An introduction to corrosion science and Engineering
R. Winston Revie
Herbert H. Uhlig
4th edition, 2008

- 8 Corrosion Volume 1
Metal / Environment Reactions
L. L. Shreir
2nd edition

- 9 Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión
Y. Meas
F. J. Rodríguez
J. Genescá
1^a edición
Facultad de Química UNAM.

- 10 Corrosion Science & Technology
David E. J. Talbot
James D. R. Talbot
2nd edition.